汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

GD&T基础及应用

第2版

王廷强　编著







机械工业出版社

CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

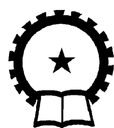
LANZAROTE
Caliente.COM

汽车先进技术论坛丛书

GD&T 基础及应用

第 2 版

王廷强　**编著**



机 械 工 业 出 版 社

本书着重介绍基于 ASME Y14.5 和 ISO 1101 标准的几何公差知识，详细地阐述了几何公差基础知识及其高级应用，以引导读者入门，并举例说明几何公差的实际应用。

本书共有十章。第一章对 GD&T/GPS 的历史和相对于尺寸公差的优势做了对比。第二章和第三章综述了几何公差的符号组成和控制框语法，并重点介绍了基准知识。第四章到第九章介绍了几种几何公差控制方法的定义、应用及检测，从基础知识到高级应用、检测方法几个方面让读者从理论到实践全面掌握几何公差的实际应用，其中精选了大量的应用实例可以作为几何公差设计时的参考。第十章是 GD&T/GPS 的综合应用，建议读者在有前九章的扎实知识后再参考这一部分。第十章对于 GD&T/GPS 的高级应用给出实例，内容涉及汽车零部件基准的选择建立、不同条件的补偿公差的计算、MMC 和 RFS 应用要点、配合设计和检具设计。

本书面向实际应用，对机械工程（如汽车类）设计人员、检测人员和加工制造人员都有极高的参考价值，对供应商质量管理和汽车零部件采购项目的从业人员也是不可或缺的工具书。

图书在版编目（CIP）数据

GD&T 基础及应用/王廷强编著．—2 版．—北京：机械工业出版社，2016.7

（汽车先进技术论坛丛书）

ISBN 978-7-111-54292-6

Ⅰ.①G… Ⅱ.①王… Ⅲ.①形位公差 Ⅳ.①TG801

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 161099 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：孙 鹏 责任编辑：孙 鹏
责任校对：潘 蕊 封面设计：路恩中
责任印制：常天培
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2016 年 10 月第 2 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 12.75 印张 · 303 千字
0 001—3 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-54292-6
定价：69.90 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：010-88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
010-88379203	金 书 网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版	教育服务网：www.cmpedu.com

前　　言

“中国制造 2025”强国战略纲领中提出，我国 2025 年的目标是迈入制造强国行列，2035 年达到世界制造强国阵营中等水平，2049 年（即建国百年）进入世界制造强国前列。这是制造业重大的历史机遇，需要工程制造行业的各类人才共同努力，并做出应有的贡献。

我国的制造业已经取得令世界瞩目的成绩，但是当前我国工业的附加值低，大而不强，缺乏核心技术，仍处于较低的质量效益水平。转型升级的艰巨任务仍需要我们工程人员的努力。

GD&T/GPS 是一门基础学科，是促进国家工业发展的一个重要工具。无论是基础加工工业、汽车行业，还是航空、航天行业，GD&T/GPS 都是不可或缺的知识。欧美和日韩对 GD&T/GPS 的教育体系已完全成熟，普遍应用于工业制造领域，并在其高精尖的产品开发中起到了积极推进的作用。

GD&T/GPS 在系统集成、降低项目风险、降低成本和提高质量方面提出了根本性的解决方案。GD&T/GPS 综合了工业发展史上成熟的设计经验，其核心理念是把设计工作中的加工工艺的可行性、测量方案的可行性进行先期分析。这门学科还将设计流程标准化，并且用精确逻辑性的图形语言加强了世界各地加工厂的沟通协作，使复杂、大型产品开发得以实现。

笔者工作中曾拜访过国内许多企业。国内加工业对于 GD&T/GPS 的应用还处于初级水平。明显的例子是普遍存在三坐标测量设备的应用和工装、专用检具的设计不正确，图样、工艺文件和检测方案不一致等情况。

本书基于 ASME Y14.5、ISO 1101 和 GB/T 1182 等几何公差标准，内容侧重于应用，以及检测和检具的设计。检具设计的关键工作在于计算，读者在设计检具或夹具时可以参考这些检具设计知识要点。

本书内容旨在介绍这门学科的应用知识，提高设计开发效率，降低企业开发、生产成本。

目　　录

前言
第一章　GD&T 简介 …… 1
第一节　GD&T 的历史 …… 1
第二节　GD&T 与国内现行的尺寸公差对比的优点 …… 2
一、图样上的三种尺寸公差 …… 2
二、几何公差和尺寸公差的比较 …… 3
三、美标 ASME Y14.5 和欧标 ISO 1101 的区别 …… 6
第二章　几何公差的符号 …… 9
第一节　几何公差的公差控制符号 …… 9
第二节　几何公差的修正符号 …… 10
第三节　公差控制框 …… 11
一、公差控制框的组成 …… 11
二、公差控制框的语法 …… 11
第三章　基准 …… 13
一、基准的定义和 3 - 2 - 1 原则 …… 13
二、孔槽定位 …… 15
三、基准布置的深入探讨——基准阵列的问题 …… 17
四、基准要素 …… 21
五、功能基准和非功能基准 …… 21
六、联合基准 …… 22
第四章　几何公差控制——形状控制 …… 23
第一节　直线度的定义、应用及检测方法 …… 24
一、直线度的定义 …… 24
二、直线度控制一个平面 …… 24
三、直线度控制一个圆柱面 …… 25
四、直线度控制中心线或中心面 …… 26
五、直线度的测量及应用 …… 27
六、拟合中心面的直线度 …… 30
七、RFS 修正情况下的直线度及检测设置 …… 30
八、对于腰形或鼓形特征的直线度测量 …… 32
第二节　平面度的定义、应用及检测方法 …… 34
一、平面度的定义 …… 34
二、平面度控制一个平面 …… 35
三、几何公差第一法则与平面度控制 …… 35



第三节　圆度的定义、应用及检测方法 …… 37
一、圆度的定义 …… 37
二、圆度控制的应用 …… 39
三、圆度控制的测量 …… 39
四、圆度的讨论 …… 40
五、圆度检测设备 …… 41
六、零件的自由状态 …… 41
第四节　圆柱度的定义、应用及检测方法 …… 43
一、圆柱度的定义 …… 43
二、圆柱度的应用及测量 …… 44
第五章　几何公差控制——轮廓度控制 …… 46
第一节　线轮廓度的定义、应用及检测方法 …… 46
一、线轮廓度的定义及阐述 …… 46
二、线轮廓度的标注方式及公差分布 …… 46
三、线轮廓度的应用 …… 48
四、线轮廓度的测量 …… 49
第二节　面轮廓度的定义、应用及检测方法 …… 51
一、面轮廓度的定义 …… 51
二、面轮廓度的控制与基准参考 …… 51
三、面轮廓度的测量 …… 53
第三节　轮廓度的综合应用 …… 56
一、组合公差框控制和独立组合公差框控制的比较 …… 56
二、轮廓度在不连续面特征上的应用 …… 58
三、轮廓度的应用及隐含的加工顺序 …… 61
第六章　几何公差控制——定向控制 …… 63
第一节　倾斜度的定义及应用 …… 63
一、倾斜度的定义 …… 63
二、特征平面到基准面的控制应用 …… 64
三、特征轴到基准面的控制应用 …… 64
四、特征轴到基准轴的控制应用 …… 66
第二节　垂直度的定义、应用及检测方法 …… 67
一、垂直度的定义 …… 67
二、特征面垂直于基准面的控制 …… 68
三、特征轴到基准面的垂直度 …… 68
四、特征轴到基准轴的垂直度控制 …… 71
五、中心面对基准轴的垂直度应用 …… 72
六、两种垂直度标注方式的比较 …… 73
七、垂直度的综合应用 …… 74
八、垂直度的测量 …… 76

第三节 平行度的定义、应用及检测方法 …… 78
一、平行度的定义 …… 78
二、特征面到基准面的控制应用 …… 79
三、特征轴到基准面的控制应用 …… 79
四、特征轴线到基准面的平行度控制一个应用特例 …… 81
五、特征轴线到基准轴线的控制应用 …… 81
六、平行度与平面度的区别 …… 83
第七章 几何公差控制——定位控制 …… 84
第一节 同心度（同轴度）的定义、应用及检测方法 …… 84
一、同心度（同轴度）的定义 …… 84
二、同心度的应用 …… 85
三、同心度的测量 …… 86
四、同心度和跳动的区别 …… 87
第二节 对称度的定义、应用及检测方法 …… 88
一、对称度的定义 …… 88
二、对称度的应用 …… 88
三、对称度、同心度和位置度的对比 …… 89
第三节 位置度的定义、应用及检测方法 …… 91
一、位置度的定义 …… 91
二、位置度的应用 …… 92
三、浮动螺栓的装配 …… 93
四、延伸公差带（固定螺栓或销的过盈装配） …… 93
五、螺纹孔的检测 …… 94
六、螺纹孔的实效边界 …… 95
七、过盈、过渡配合中的延伸公差 …… 97
八、位置度、同心度（同轴度）和跳动控制的比较 …… 100
九、同轴（轴线重合）控制总结 …… 101
十、MMC时的零公差约束 …… 101
十一、零位置度公差的应用范围 …… 103
十二、零公差的应用 …… 103
十三、位置公差控制的过盈配合 …… 104
十四、组合公差 …… 104
十五、组合公差控制框的配合公差 …… 106
十六、对于组合公差框控制的尺寸特征的匹配设计 …… 113
十七、组合公差控制框和独立组合公差控制框的区别 …… 116
十八、初始定位的方式 …… 117
十九、尺寸公差到位置度公差的转换 …… 120
二十、允许偏差和实际偏差 …… 124
二十一、补偿公差 …… 124



二十二、非圆柱面匹配特征的位置 …… 126
二十三、位置度边界 …… 127
二十四、位置度控制的对称度（RFS） …… 129
二十五、位置度控制的对称度（MMC） …… 129
二十六、两个方向上的位置度控制 …… 129
二十七、同步或独立要求 …… 132
二十八、位置度总结 …… 138
第八章　如何逻辑定义零件公差 …… 139
一、线性分段方式——曲轴子装配 …… 139
二、成本与几何公差控制 …… 143
第九章　几何公差控制——跳动控制 …… 149
第一节　圆跳动的定义、应用及检测方法 …… 149
一、圆跳动的定义 …… 149
二、圆跳动的应用 …… 150
三、V 形架的检测方式探讨 …… 151
四、锥面到轴的控制应用 …… 152
五、垂直于基准轴的面的控制应用 …… 152
六、同轴于基准轴的面的控制应用 …… 153
七、复合基准轴的测量（中心孔方式） …… 153
八、两个基准的方式 …… 154
第二节　全跳动的定义、应用及检测方法 …… 155
一、全跳动的定义 …… 155
二、全跳动的应用 …… 156
三、锥面到基准轴的控制应用 …… 156
四、垂直于基准轴的面的控制应用 …… 157
五、全跳动的测量 …… 157
六、基准的建立 …… 160
第十章　几何公差综合应用 …… 162
一、基准建立的应用实例一 …… 162
二、基准建立的应用实例二 …… 162
三、汽车门外板的基准设置方案实例 …… 164
四、汽车翼子板的基准设置方案实例 …… 165
五、汽车梁的基准设置方案实例 …… 166
六、补偿公差计算（孔或内部特征） …… 166
七、补偿公差计算（轴或外部特征） …… 167
八、轴的实效边界计算 …… 168
九、孔的实效边界计算 …… 168
十、RFS 修正的孔的配合边界与零公差注意事项 …… 168
十一、GD&T 中两种尺寸标注的比较和 Ppk 曲线的应用 …… 169

十二、尺寸公差和几何公差的转换 …… 171
十三、MMC、RFS 和 LMC 的应用及对比 …… 173
十四、第一法则（包容原则）应用实例 …… 174
十五、零件的配合设计应用 …… 175
十六、匹配公差设计实例一 …… 182
十七、匹配公差设计实例二 …… 183
十八、检具设计实例 …… 183
十九、工艺基准的设置及检测方案设置 …… 185
二十、公差分析 …… 188
二十一、环套的最小壁厚计算 …… 190
术语解释 …… 192

第一章　GD&T 简介

第一节　GD&T 的历史

对于几何公差，世界上通行的有美标 ASME Y14.5［几何尺寸及公差（Geometry Tolerancing and Dimensioning，以下简称 GD&T）］和欧标 ISO 1101［产品几何公差规范（Geometrical Product Specifications，以下简称 GPS）］。GD&T 和 GPS 工程理念都是相同的，只是在符号的表达上稍微有些差异。它们在尺寸控制逻辑上都是相同的，但是对于一些公差控制的理解还是有差异，比如包容原则的定义。历史上 GPS 先出现，后来才有 GD&T，它们在发展过程中相互借鉴，发展至今已有 100 多年的历史。GPS 的总标准 ISO 1101 其下包括 30 个左右的子标准，难以全部收集学习。而 GD&T，主要内容都包含在 ASME Y14.5 中。所以对于初学者，使用 ASME Y14.5 来系统地学习比较合适。在 GD&T 和 GPS 有差异的地方，本书会做详细区分讲解。国内的几何公差标准是 GB/T 1182，遵循欧标 ISO 1101。

几何公差的产生是因为随着生产技术和检测技术的提高，尺寸公差系统已经不能充分传达设计意图，设计者迫切需要一种能够有精确逻辑的工程语言来传达设计意图。尺寸公差这种工程图形语言很难将创造性的发明通过纸上传递，并被其他人准确理解。设计者定义的尺寸公差通常会有多种合理解释，而制造者或检测者不同的解释，会导致不能精确传达设计意图。如果某零件由多种解释中的一种方式加工，但与其相匹配的零件却选择另一种方式加工，那么即使各方都按照图样的规定制作，也不能保证它们能够装配到一起。这就不单单是加工精度的问题了。现代的工业加工方式，供应链分布很广，并且数量多，这样给系统集成造成了大量困难。由此人们意识到需要一个更好的方式来解决这个问题，于是便开始了几何公差的探索。

工业生产中重要的是正确地解读图样，以合理的成本来进行加工生产，而不是无限制地提高零件精度。

几何公差标准（ASME Y14.5/ISO 1101）正是在这种背景下产生的，是各国政府、军队和私人企业代表研究和协作的结果，也是经过全世界的国家相关领域的人员持续地交流而不断改进而形成的迄今最为完善的工程设计语言。几何公差标准包含大量的图符、概念和逻辑法则。相关标准可以看作是包含图符和语法的工具书。对设计者而言，这些图符能更好地传递设计意图，更具逻辑性。目前这两个标准（ASME Y14.5/ISO 1101）在国内应用最广泛，它们的工程理念完全一致，除包容原则和少数的特殊修正符号，不影响相互解读。从标准收集难易来说，笔者建议从 GD&T 入手学习，本书的内容遵循 ASME Y14.5/GD&T 标准。

这两个标准的实施，使人们能够用这种图符语言精确且有逻辑地传递设计意图，设计者可以更详细地描述一个工程设计，并且保证了加工人员和检测人员在相同的条件下能够更加好地协作完成工作。设计者可以通过使用相关标准（ASME Y14.5/ISO 1101）向全世界精确地公布其发明创造。

本书的内容可帮助应用者在零件尺寸、外形、方向和定位的几何参数上精确理解

GD&T/GPS。应用者可以确信，如果零件合理地按照 ASME Y14.5/ISO 1101 规则开发，零件必定会在总成状态下完成装配，即使是开发含有上千个零件的汽车类设备。在正式开始我们的内容之前，让我们先比较传统的尺寸公差系统和 GD&T/GPS 系统，了解一下几何公差控制的优越性。

第二节　GD&T 与国内现行的尺寸公差对比的优点

开始本节内容之前，有必要声明一下，GD&T（以下或称几何公差）固然是复杂和高级工程设计时必不可少的设计工具语言，但这不意味就完全抛弃尺寸公差的学习。扎实的尺寸公差知识是学习 GD&T 的必要基础。一个标注完善的尺寸公差可以很容易地转换为明确的 GD&T。并且在一些设备上，如钣金行业中的压力机，有名的如日本的 AMADA 压力机，因为这种自动压力机的 G 代码是使用坐标尺寸定位加工特征的，尺寸公差在这种设备上就体现出比 GD&T 更好的优越性。制造者可以直接根据图样转换出 G 代码。如果使用 GD&T 标注，制造者还要费时间转换成相对坐标。图 1-1 所示为 AMADA 压力机和钣金零件设计图。

另外，对于使用直尺或游标卡尺就可以完成检验的零件，尽可能使用尺寸公差标注，以减少检测的成本。对于检具的设计也要尽可能使用尺寸公差标注，以减少验证的成本。

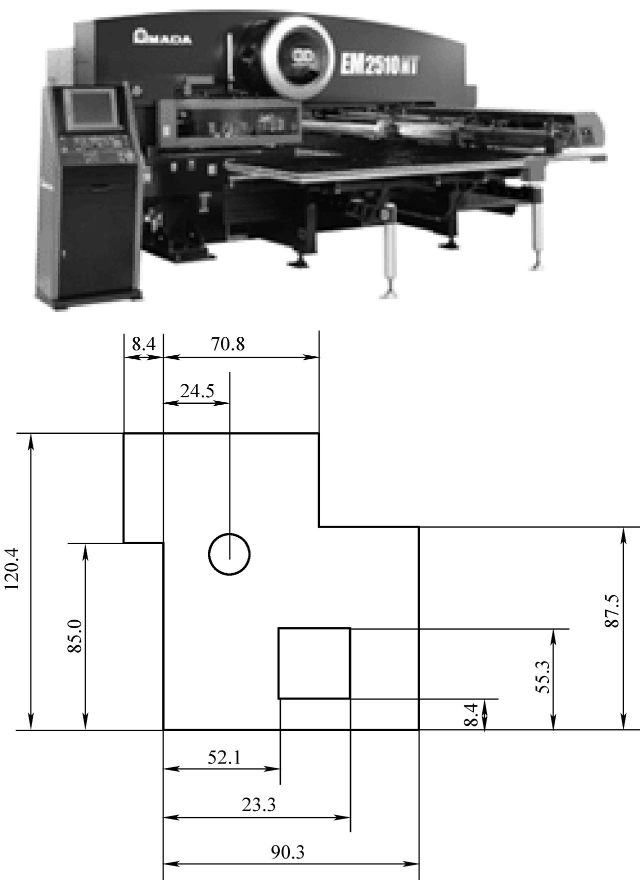


图 1-1　AMADA 压力机和钣金零件设计图

一、图样上的三种尺寸公差

如图 1-2a 所示，公称尺寸不包含公差。公称尺寸用来定位公差带的位置。公称尺寸被包含在矩形框内在图样上表示出来，并非需要检测的尺寸。

一个特征的理想尺寸或定位就是公称尺寸，距理想尺寸允许在一定范围内的偏差，就是传统的尺寸公差。公差是被用来控制特征的加工变差。被控制的特征（如孔、轴、槽、面等）通常会有一个公称尺寸和公差控制框（如位置度、轮廓度等）联合控制。控制框中的公差规定了相对于理想尺寸的偏移量。

公称尺寸不意味着零件上的特征必须符合理想位置或尺寸。这些公称尺寸只是用于理想的定位或理想的尺寸，公差给出了允许的偏移量，并显示在控制框中。公差带可以要求得很



窄（成本高）或者很宽（成本低）。

公称尺寸就是图样上或数模上标注或量取的尺寸，是一个特征的理想尺寸。公称尺寸定义了特征的理论轮廓线或公差带的起始位置，体现的是设计者的设计趋势。这不同于基孔制或基轴制配合的相关标准中公称尺寸的定义，比如这种标注方式在GD&T中是不允许的。例如，公称尺寸23.0mm落在公差带之外，不是设计或加工中的理想尺寸。公称尺寸23.0mm在基轴制或基孔制中不是设计者的设计趋势。

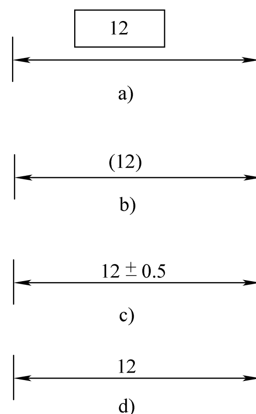


图1-2　三种常见的线性尺寸
a）公称尺寸（Basic Dimension）　b）参考尺寸（Reference Dimension）　c）、d）线性尺寸和公差（Linear Dimension and Tolerance）

如图1-2b所示，参考尺寸通常是尺寸链中作为工艺参考的验证尺寸，一般为尺寸链中的冗余尺寸，同样不需要检验。参考尺寸在图样中应标注在括号内。

如果公称尺寸后有公差，就是尺寸公差。如图1-2c中的线性尺寸公差，这样的尺寸是需要检验的。在图1-2d中，这个尺寸标注的公差默认在标题框中，通常这些尺寸如果没有特殊要求，不需要检测，通常由生产过程中的设备来保证精度。

二、几何公差和尺寸公差的比较

1. 公差带的比较

首先我们从这个经典的例子说起，图1-3所示为一个孔板尺寸公差的标注和这个尺寸公差控制的正方形公差带。

通常情况下尺寸公差带是正方形的。在一些特殊的要求下（如保证某一方向上的壁厚或特定的功能），尺寸公差带也可能是矩形的。

在实际装配中，孔和轴的配合间隙在360°方向上都应该是相等的。这就意味着配合轴的浮动范围（轴的轴线的位置公差带）应该是一个圆柱面。所以实际装配情况的公差带与尺寸公差定义的矩形公差带是不相符合的。

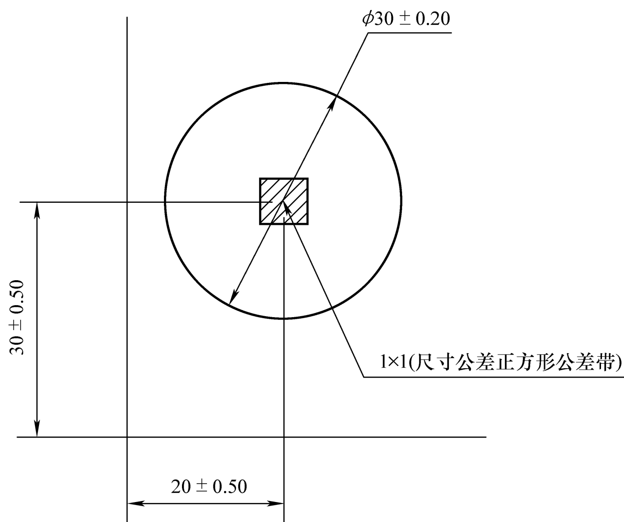


图1-3　尺寸公差约束的公差带

正方形的公差带没有反映出孔的实际装配条件。轴的轴线在矩形的公差带内浮动，在360°方向上距离理论的装配中心是不等的。当轴线处于正方形的对角线位置上，距离理论装配中心最远，导致的装配间隙最小。当轴线处于

正方形的4个正交方向上配合间隙最大。所以为了保证装配间隙或避免干涉，设计者应该以这个矩形公差带的对角线的距离来计算。但是通常的做法都是以正交方向上的浮动距离来计算的，这就导致了产品在最终成品上会出现干涉的风险。

可以判断出，这个实际配合的圆柱面公差带外切于尺寸公差的正方形柱面。即如果正方形的公差带能够满足配合，那么以这个正方形对角线为直径的圆柱也能满足装配。对于这个装配的圆柱面公差带，可以按图1-4进行等效GD&T设计，这个位置度公差控制方式描述了一个圆柱面公差带 $\phi1.4$mm，为正方形公差带的对角线长度。

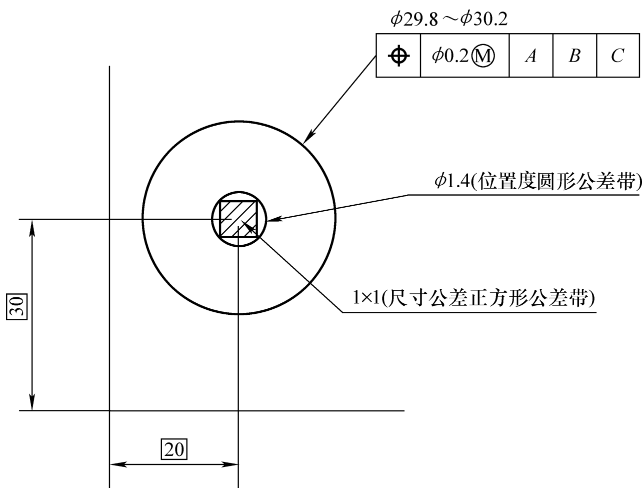


图1-4　几何公差（位置度）约束的等效公差带

如果实际零件尺寸落在圆和正方形不相交的区域，就意味着合格的零件被当作不合格的零件拒收。这一部分的面积是尺寸公差带不可避免产生的，造成了浪费，同样地，也因为公差控制更严，加工成本也会增加。

两种公差带的面积计算比较如下：

正方形的尺寸公差带面积

$$S_1 = 1 \times 1\text{mm}^2 = 1\text{mm}^2$$

圆形的几何公差带面积

$$S_2 = \pi \times \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 \text{mm}^2 = 1.57\text{mm}^2$$

两种公差标注的面积差

$$S_0 = S_2 - S_1 = (1.57 - 1)\ \text{mm}^2 = 0.57\text{mm}^2$$

几何公差比尺寸公差带多出的面积比

$$S_0/S_1 = 57\%$$

几何公差的公差带比尺寸公差的面积区域大出57%（见计算式），并且，如果应用最大实体原则，意味着当尺寸由最大实体尺寸增大到最小实体尺寸时，这个值还可以随着扩大，这就是几何公差中的公差补偿。更大的公差意味着更具经济性。但是我们不应该判断至少57%的零件被浪费掉了，因为稳定生产的零件尺寸遵循不相关随机分布，是一个正态分布曲线，尺寸集中在中值附近，需要知道相关的标准差才能计算出不合格的零件数量。

对于这个装配孔，要满足装配功能，需要一个位置公差。我们观察一下，尺寸公差定位这个孔的公差带是一个正方形，如图1-3所示。如果不考虑壁厚影响和其他特殊要求，在此例中几何公差规定的公差带应该是一个圆形。就是这个孔和轴的装配在任何方向上应该是等间隙的，如图1-4所示。假设一个螺栓穿过此孔，合理的理解是围绕螺栓在任何方向上间隙（即设计公差带）的分布是均匀的（圆形的公差带）。但是很明显，尺寸公差的公差带的分布是不均匀的，对角线方向上的变化最大，这就导致了正方形公差带必须内切于圆形公差



带，牺牲了空白区域内的公差带，尺寸公差无法描述这一合理公差带区域。位于这个区域内的公差（实际能够满足装配）被作为不合格的零件检出。看一下这部分的面积比，达到57%！从这个例子可以看出，尺寸公差带人为地缩小了公差带的大小。这就意味着，合格的零件以废品的形式被检出，造成浪费！而缩小公差带，则增加了加工成本！而且我们在本书后面会介绍，几何公差控制的公差带不是固定的，可以应用公差补偿的理念，在公差要求的范围内扩大公差带，以降低成本；而尺寸公差是一个固定的公差带，无法优化，给公差分配带来困难，成本相对较高。

尺寸公差的矩形公差带无法适应复杂的装配。比如异型孔，如销孔特征的公差带是何种形状呢？一些工程图的标注习惯将长圆孔的位置度描述成圆形，或者为尺寸公差的矩形，我们要注意这种标注方式会造成最终无法装配的风险！对于公差带的理解直接关系检测销的形状设计。我们在讲述位置度的时候会详细解答这个问题。

几何公差的公差带可以按照实际的装配需要去定义，也容易验证，能够实现检具检验。

2. 基准的问题

尺寸公差往往需要假设测量基准点，造成两个配合零件即使都按照图样制作，也可能造成实际不能够装配在一起，如图 1-5 所示。

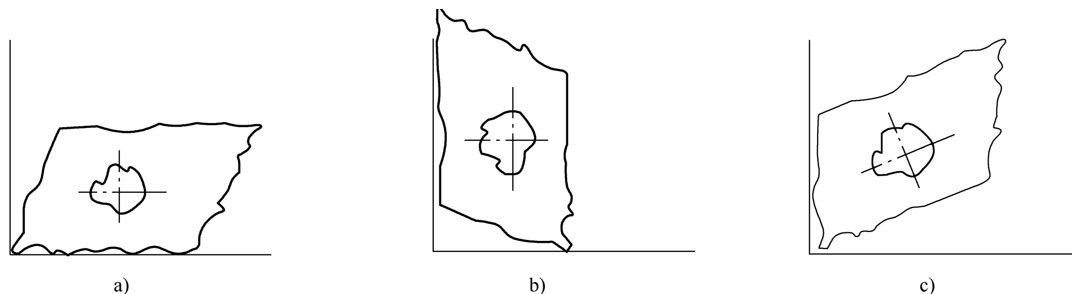


图 1-5　尺寸公差的基准不确定性

对于任何实际加工零件，如图 1-5 中的孔板，在微观状态下会产生这种平行四边形的情况。这个零件如果在设计时以底边定位，设计者无法使用尺寸公差语言来表达这个要求。若加工者或其他的供应商无法直接和设计者沟通，则会按照设备的情况进行工艺定位加工中间的孔，如图 1-5b 所示。这种假设按照尺寸公差图样理解没有错误。检测者可能也假设出一个测量基准来测量中间的孔，如图 1-5c 所示。从这个流程可以看出，尺寸公差存在合理假设，描述逻辑不严密造成了最终检测可能合格，但是无法完成装配的情况。基准的不确定造成了项目的风险。

图 1-6 存在两种合理的解释：①先加工孔 B，然后由孔 B 定位加工边 A；②先加工边 A，然后由边 A 定位加工孔 B。这两种工艺方式实际上在一定精度要求下会造成明显的变差。类似存在假设的尺寸公差标注的还有很多。假设就意味着多种可能，处于假设状态的设置也会因人不同。对于复杂的零件，这种基准不明的情况会导致不同的公差积累结果。图 1-5 和图 1-6 所示的标注不能明确加工的工艺和测量的基准。

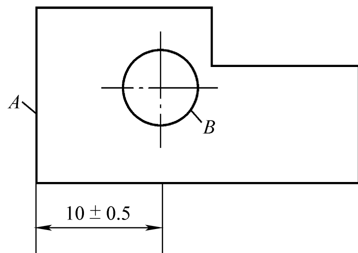


图 1-6　尺寸公差的工艺不确定性
（不能确定是孔定位边，还是边定位孔）

另外，尺寸公差不能体现实际测量、加工或工装检具设计时基准选择的顺序性。几何公差有完善的基准定义。这个优点虽然是几何公差的核心内容，但不是被很多人了解。基准的设置不同会产生不同的加工结果，这在尺寸公差中也会体现。一个复杂的零件，对于一个有经验的工程师，他会将所有的尺寸尽量设置在一个基准点上，也就是说所有的测量起始于相同的一点，但不能解决所有的基准定位问题。

总之，尺寸公差体现不了基准顺序，有时缺少测量的基准点，并很难描述一个复杂的零件。一个零件在空间中有六个自由度，几何公差可以很容易地通过基准约束这些自由度，而尺寸公差没有这方面的功能。

3. 对于异形特征的描述

通过图1-7可以明显看出，几何公差比尺寸公差表达更简练，能简单准确地传递设计意图。

图1-7所示是对一种零件的两种标注方法。对于这个异形件，尺寸公差方法不仅繁琐而且不能准确表达这个零件准确的曲线轮廓，因为在坐标点之间的曲线轮廓是没有定义的。而几何公差的方法可以连续地描述这个曲线。由于CAD、CNC和CMM技术的发展，加工工艺和检测方法日趋先进，几何公差方法的优势更加明显。

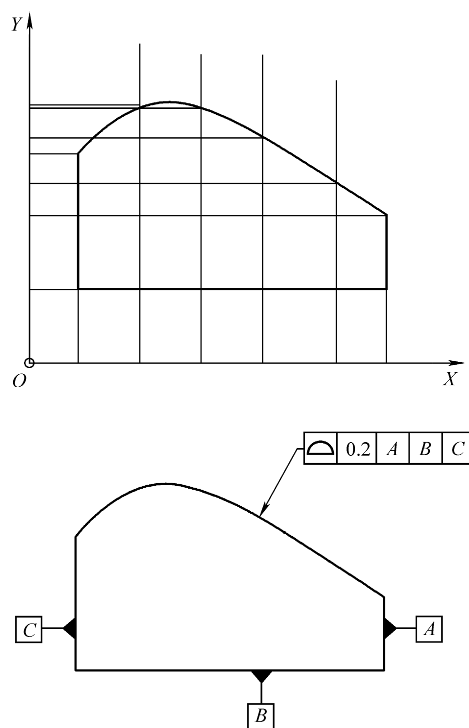


图1-7　尺寸公差和几何公差对于异形特征的定义

传统的尺寸公差测量方式停留在二维和坐标法验证层面，而CMM是在三维空间验证一个零件，几何公差正是为适应这种先进检测加工设备而产生的。对于几何公差，更快的方式是使用功能检具，只验证合格或不合格两种结果。但这种检具不能收集数据，如数量型测量工具CMM设备。

本书的前部分内容是关于几何公差的基础知识介绍，后部分内容是一些精选的几何公差应用实例。

三、美标 ASME Y14.5 和欧标 ISO 1101 的区别

ASME Y14.5和ISO 1101在几何公差符号上几乎是通用的，除了沉孔符号不同；另一个最大的区别是包容原则上的设置。但只是表达方法上的不同，它们实现零件的尺寸控制的工程理念是一样的。

ASME Y14.5默认为包容原则，而ISO 1101默认为独立原则。ASME Y14.5的公差第一原则就是包容原则：一个尺寸特征的形状由这个尺寸特征的最大实体尺寸控制。其意义是规则形状的尺寸特征（圆柱面、球面和平行面）表面不应该超出尺寸范围内的最大实体尺寸（MMC），最大实体尺寸为理想尺寸，也是图样中所代表的理想（包容）边界。从逻辑上推理，这个MMC边界的形状公差为零，不存在任何形状变差，如直线度或平面度（当然



实际生产过程中不可能生产出这个尺寸的零件）。

ASME Y14.5 的第一法则：当一个特征只存在尺寸公差时，最大实体尺寸 MMC 代表特征的理想边界。

图 1-8 所示是用传统的基轴制和基孔制方法设计的轴和套筒，基轴制和基孔制方法设计的零件没有几何公差约束，默认直线度或圆度等几何公差为零。但实际上这种理想状态的零件不存在，所以在配合设计上必然会出现一些合格零件产生干涉并无法装配的现象。

图 1-9 所示是 ASME Y14.5 法则的一个解释，以传统尺寸公差标注的最大实体尺寸（MMC）和最小实体尺寸（LMC）为边界来限定几何公差。

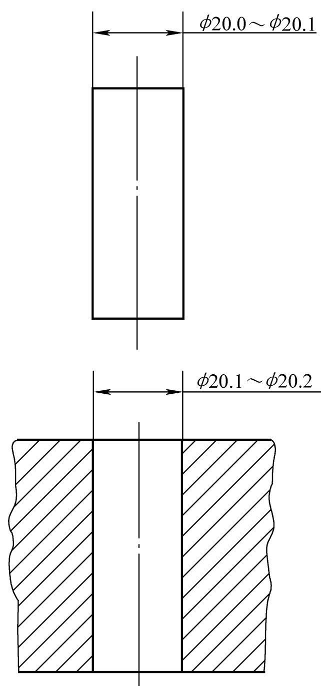


图 1-8　尺寸公差与包容边界

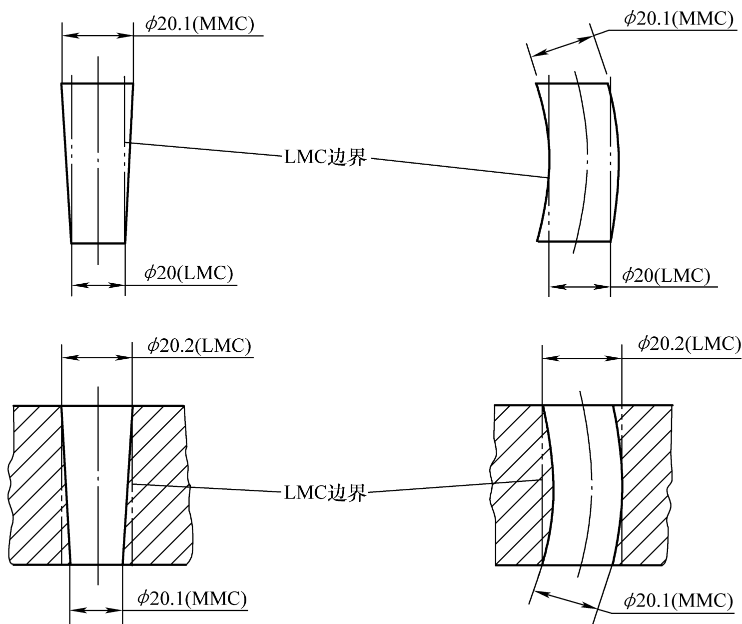


图 1-9　GD&T 法则的解释

对于独立要求，ASME Y14.5—2009 规定使用符号Ⓘ来定义，如图 1-10 所示。此时，尺寸公差的最大边界不再与形状公差（本例为直线度控制）相关，在检测上各自独立进行验证。这个零件的最大包容面不再是最大实体尺寸 ϕ35.7mm，最大的包容边界（配合边界）是 35.9mm。

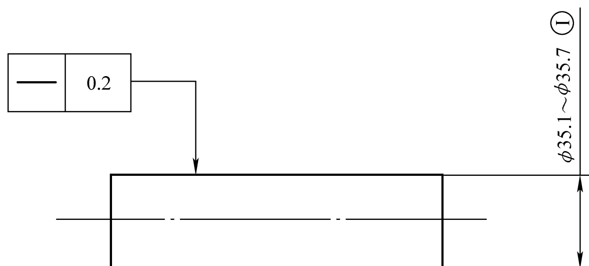


图 1-10　GD&T 独立原则的表示方法

对于包容原则控制下的特征，当实际加工的尺寸特征从最大实体尺寸（MMC）变化到最小实体尺寸（LMC）时，形状变差（如圆度、直线度或平面度）允许相应数值的增量。

欧标 ISO 8015 对于包容原则规定尺寸特征（如圆柱面特征或两个平行面）不应破坏最大实体尺寸（MMC）的理想界面。包容原则在图样上的表示方法是在尺寸公差后使用符号

Ⓔ来定义。注意，不同于 ASME 的规定，如果没有符号Ⓔ在尺寸公差之后，在欧标中默认为不相关原则。

图 1-11 所示为包容原则的解释，零件的理想最大实体包容界面 ϕ20. 1mm 不能超出。每一个截面的尺寸不能小于最小实体尺寸 ϕ20mm。也就是这个零件的通规理论尺寸是 ϕ20. 1mm，止规理论尺寸是 ϕ20mm，当然制作时也要考虑 10% 的制造和磨损误差。这样就限制了零件的直径尺寸在 ϕ20 ~ ϕ20. 1mm 之间变化。当轴的直径尺寸恰好为 ϕ20. 1mm，那么这个轴的圆度和直线度误差应该为零，以满足包容原则。

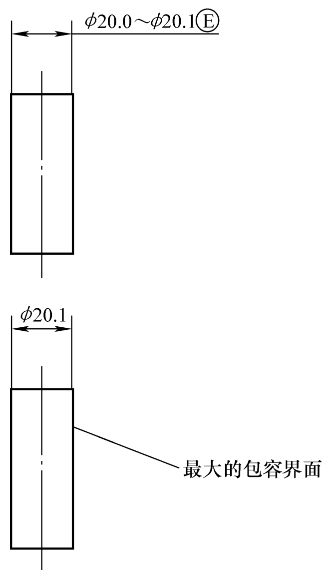


图 1-11　ISO 中的包容原则定义方式

图 1-12 所示的零件在 ISO 中是独立原则，在这个轴的每一个截面上，只要相对尺寸在 ϕ20. 1mm 之内、圆度在 0. 05mm 之内且直线度在 0. 02mm 之内，那么零件为合格。这意味着这个零件由于圆度误差和直线度误差，最小包容界面可能大于 ϕ20. 1mm。在设计这个轴的配合零件（孔）时最小尺寸应该大于 ϕ20. 1mm。独立原则下定义的零件，受控特征的形状不受控制或需要格外的形状公差控制框进行控制，对于本例的轴来说，最大包容界面或匹配特征的边界面是最大实体尺寸 ϕ20. 1mm 加上形状误差（圆度 0. 05mm 和直线度 0. 02mm）的综合结果。

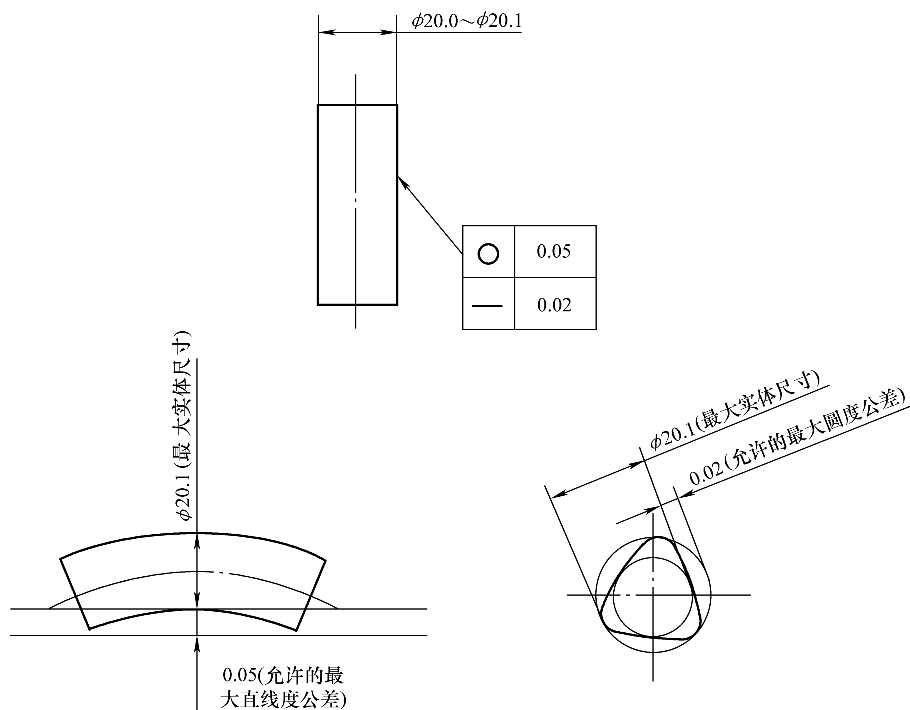


图 1-12　ISO 的独立原则表示方法及解释

第二章　几何公差的符号

第一节　几何公差的公差控制符号

几何公差符号能够传递重要的尺寸控制信息，是工程语言的基本语言单位。理解这些符号是学习这门工程语言的基础。几何公差控制符号见表 2-1。

表 2-1　几何公差控制符号

与基准的关系	公差控制类型	公差控制名称		符号
不相关基准	形状控制	直线度	Straightness	—
		平面度	Flatness	▱
		圆度	Circularity	○
		圆柱度	Cylindricity	⌭
相关或不相关基准	轮廓度控制	线轮廓度	Profile of A Line	⌒
		面轮廓度	Profile of A Surface	⌓
相关基准	定向控制	倾斜度	Angularity	∠
		垂直度	Perpendicularity	⊥
		平行度	Parallelism	//
	定位控制	位置度	Position	⌖
		同心度（同轴度）①	Concentricity	◎
		对称度	Symmetry	⌯
	跳动控制	圆跳动	Circular Runout	↗
		全跳动	Total Runout	⌰

① 当控制中心点时，称为同心度；当控制轴线特征时，称为同轴度。

几何公差控制方式一共有 14 种，形状控制经常用于零件初始定义的主基准的定义。如用平面度定义零件的第一个基准面，其他特征或第二和第三基准相对这个平面定义，或用圆度定义的第一个圆柱面，如轴承的外圆面。因为检测方式困难，设备成本高，并且同心度、圆度和圆柱度的检测节拍长，并需要经过专门培训的操作者才能操作检测仪器，所以不推荐用同心度、圆度或圆柱度控制。跳动的检测相对于圆度和圆柱度，更高效和经济。跳动控制

通常被应用在高速旋转和要求动平衡的零件上，通过控制质量分布均匀来减少零件的振动，比如汽车的轮毂设计。但在高精密零件的加工中，圆度和直线度常常被配合使用。垂直度通常用来定义第二基准。

对称度一度被取消过，后来又重新纳入，现在只作为装饰用途。

位置度用来定义特征的中心位置和配合尺寸的大小，使用在装配设计中。轮廓度用来定义特征的形状。位置度和轮廓度两个公差共同控制现在应用得更广泛，功能也最强大，也容易设置和进行检测，推荐使用。

第二节　几何公差的修正符号

表 2-2 列出了一些常用的几何公差修正符号。

表 2-2　几何公差修正符号

名称	符号
最大实体要求 AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION	Ⓜ
最小实体要求 AT LEAST MATERIAL CONDITION	Ⓛ
延伸公差带 PROJECTED TOLERANCE ZONE	Ⓟ
自由状态条件 FREE STATE	Ⓕ
正切平面 TANGENT PLANE	Ⓣ
直径 DIAMETER	ϕ
球直径 SPHERICAL DIAMETER	$S\phi$
半径 RADIUS	R
球半径 SPHERICAL RADIUS	SR
受控半径 CONTROLLED RADIUS	CR
参考 REFERENCE	(　)
弧长 ARC LENGTH	⌒
统计公差 STATISTICAL TOLERANCE	⟨ST⟩
范围 BETWEEN	←→

符号Ⓜ代表 MMC，最大实体要求。MMC 修正的目的是节省成本。MMC 表示零件的最重状态，如孔的最小尺寸为 MMC 尺寸，轴的最大尺寸为 MMC 尺寸。

符号Ⓛ代表 LMC，最小实体要求。LMC 不常在产品图样中应用到，LMC 的应用目的是保证最小的加工余量，所以在产品的工艺图样中会经常应用到。另外在检具中也经常应用到这个修正符号。

符号Ⓕ是自由状态条件测量，自由状态条件包含测量是在实验室温度和湿度下测定的。被检测的零件图会有这样的提示，如在公差控制框中引用自由状态符号Ⓕ来说明零件的测试是在自由状态下。如果没有这个约束条件，则默认是自由状态，所以符号Ⓕ是个冗余标注，其他如 RFS 也是默认标注。RFS 在 2009 版以前可以使用符号Ⓢ表示，2009 版以后的 ASME Y14. 5 取消了符号Ⓢ，这个符号不再使用，只有默认方式。

一些情况下，会有自由状态的特殊要求，比如在薄壁柔性零件测量时在公差控制框下，标识在规定的夹紧点下测量，或是在仅有支撑的情况下测量。



统计公差符号〈ST〉的应用越来越广泛，用来跟踪关键尺寸。

延伸公差符号Ⓟ用于有厚度的两个零件的装配，定义材料外部，起始于装配面特定长度上的公差带。

这些修正符号非常重要，在一定意义上，这些修正符号改善了公差带的分布，使加工工艺变得可行。本书会结合这 14 种公差控制方式解释这些修正符号的作用。

第三节　公差控制框

一、公差控制框的组成

公差控制框的组成如图 2-1 所示。公差控制框有三部分，第一部分是公差符号框，为 14 个公差控制符号的一种。第二部分是公差带框，规定公差带的形状、公差带的大小（即公差值）和公差修正符号［如符号Ⓜ为最大实体条件（MMC）修正符号］。第三部分是基准框，定义了特征的约束空间，这一部分最多只能有三个子框，定义了第一基准、第二基准和第三基准，以建立完整的坐标系。如果基准是尺寸特征，也可以使用最大实体要求（MMB）、最小实体要求（LMB）和尺寸不相关要求（RMB）修正。

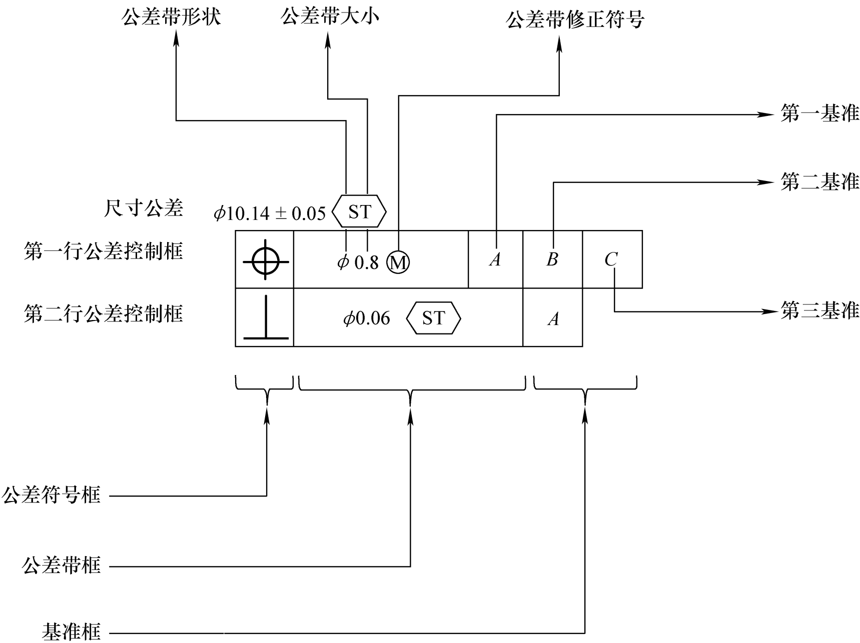


图 2-1　公差控制框的组成

二、公差控制框的语法

公差控制框的语法是从左到右来解读的。请看图 2-2 所示的例子，这是一个位置度公差控制框，上面部分是尺寸公差，假如这个受控特征是孔，则这个孔的最大实体尺寸是直径 ϕ7.2mm，最小实体尺寸是直径 ϕ7.7mm。如果受控特征为轴，则这个轴的最大实体尺寸是

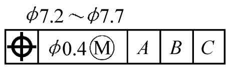


图 2-2　位置度公差控制框

ϕ7.7mm，最小实体尺寸是ϕ7.2mm。

几何公差框一定要按照如下语法规则解读：

以图2-2所示的标注为例，阅读公差框的方法是从左向右。此特征的几何公差控制为孔（或轴）的位置度控制，因为公差带由符号Ⓜ修正，在孔（或轴）最大实体尺寸时（孔为ϕ7.2mm，轴为ϕ7.7mm），公差带为直径ϕ0.4mm的圆（或圆柱面），这个公差带是设定在基准框架*A*、*B*和*C*内，先将零件置于主基准*A*上，然后是次基准*B*上，最后将零件靠紧在第三基准*C*上［这些基准可以由最大实体要求（MMB）、最小实体要求（LMB）和尺寸不相关要求（RMB）来修正，本例为RMB修正］。

需要注意的是，由于MMC对于位置度公差带的修正，公差带将随实际尺寸变化而变化。当特征的尺寸由MMC向LMC变化时，配合间隙也相应地增大，位置度公差获得相应的浮动补偿。另外，对于基准的顺序，如前面所提到的，一定不能改变次序或按照字母顺序，一定是按从左到右的顺序解读。在使用检具和CMM检测时，这个顺序也是基准的建立顺序。

公差框也规定了基准的尺寸要求。如此例是用不相关原则（RMB）修正的，如果使用基准销，表示使用与实际零件的基准特征的高点相切的包容面作为基准特征（模拟基准和实际零件特征之间接触，没有间隙），一般使用锥销或膨胀销来作为基准特征模拟。如果使用MMB修正，将是间隙基准销或套。MMB和LMB在修正基准特征时通常应用在基准特征是尺寸特征时，面特征不是尺寸特征，不存在最大、最小实体尺寸，不能被MMB或LMB修正。

公差控制框的标注有多种方式。这些公差控制框可以出现在特征的轮廓延长线上、尺寸线上或者是在引线上，如图2-3所示。在不同的标注位置，直接关系图样的正确解读、测量方案和检具的实现方式，我们将在各个几何公差控制框中说明这一重要的内容。

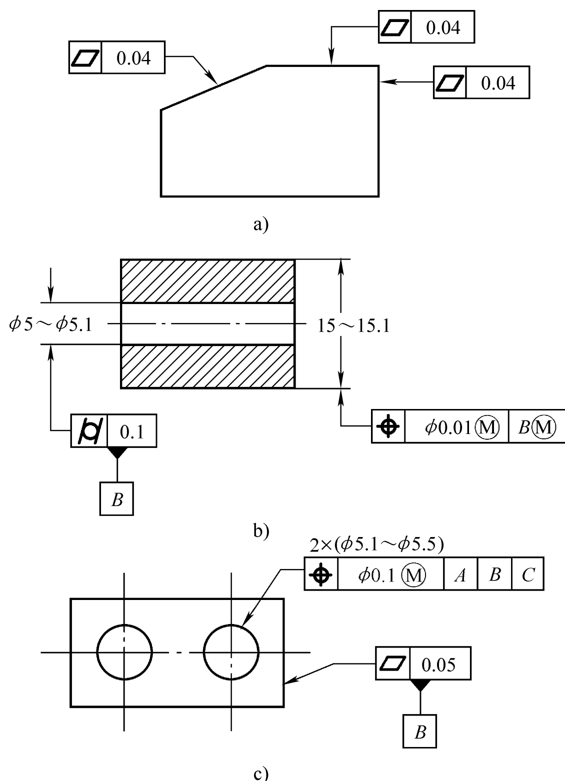


图2-3　几何公差控制框的标注位置

a）轮廓延长线上　b）尺寸线上　c）引线上

图2-3a所示平面度公差控制框分别控制相应所处延长线上的特征。

图2-3b所示位置度的公差控制框控制由外圆柱面形成的中心线。而圆柱度控制的是这个内圆柱面上的点。基准特征*B*为这个内圆柱创建的轴线。

图2-3c所示的基准*B*控制零件右侧面的平面度，位置度公差控制框控制的是两个孔的中心线，在最大实体尺寸（MMC）时，即ϕ5.1mm时，公差带为ϕ0.1mm的两个圆柱面。

第三章　基　　准

基准的符号通常在图样上表示为图 3-1 所示的形式。

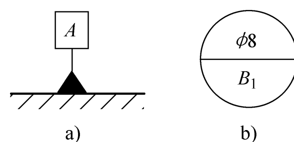


图 3-1　基准符号

图 3-1a 所示符号直接标注到零件的基准特征上；图 3-1b 所示符号是对于支撑面的定义，符号下半部分中的 B_1 是基准的标识名称，上半部分代表了基准与零件接触面积的大小，此例中其支撑面积为 ϕ8mm 的圆面，如图 3-3 所示，目的是保证测量的可重复性。如果上半部分为空，表明基准的支撑为点或线接触。

图 3-2 所示是使用点接触的图样表示方法。图 3-2b 所示是基准实现形式。

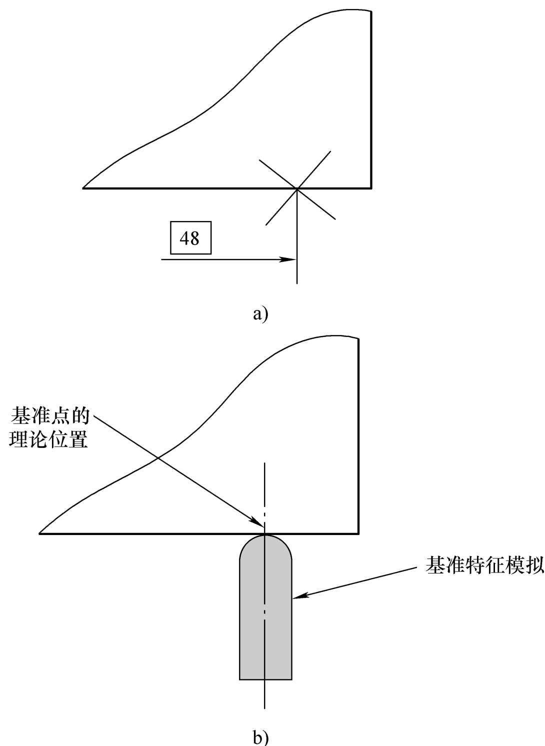


图 3-2　点基准 B_1

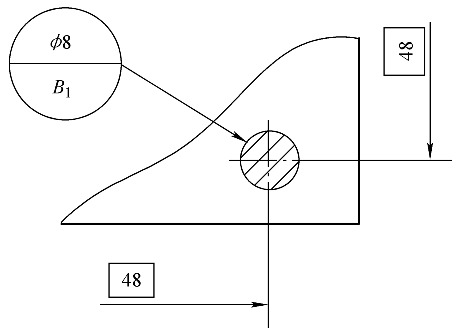


图 3-3　圆面支撑基准 B_1

一、基准的定义和 3－2－1 原则

基准是理论上精确的点、线和面。这些点、线和面存在于三个互相垂直的相交面上，这三个垂直面被称为基准参考框架。图 3-4 说明了一个零件在基准框架内的 6 个自由度。基准在数模上或图样上称为理论基准特征，在零件上称为基准特征，在检具和工装上称为模拟基准（检具上的支撑或定位）。基准特征和基准模拟在实际制造过程中都存在误差，通常基准

模拟的公差带是零件基准公差带的 1/10（通常公差带考虑 5% 的制造误差，以及 5% 的磨损保留量）。

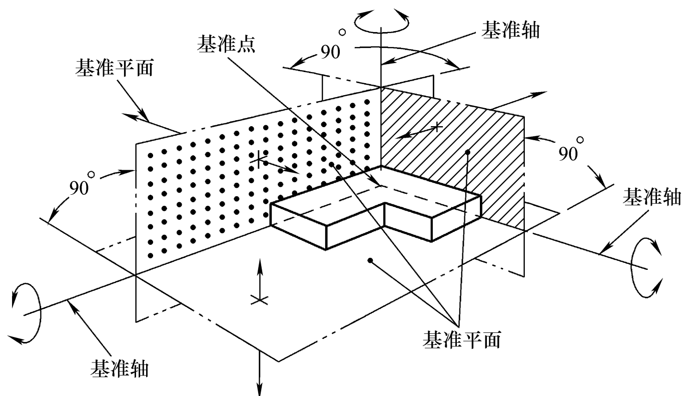


图 3-4　一个零件在基准框架内的 6 个自由度

基准的目的就是去除一个零件在空间中的 6 个自由度（平移和旋转），当一个零件在空间中的 6 个自由度被完全约束，则零件上的每一个点、线和面都有一个确定的坐标，才能开始定义一个零件上的各个特征。

图 3-5 展示了基准的三个表示状态。数模上的基准是理论的几何特征，公差带为零。零件上和检具上的基准在实际生产中必然存在误差，但是零件上基准特征的波峰、波谷大于检具。这意味着检具的公差要小于零件的公差，通常为零件公差带的 10%，也就是使用检具检测的零件公差带实际只应用了 90%。

基准框架实际就是直角坐标系，这个直角坐标系由三个基准面组成。当零件放置在第一个坐标平面 X（称为第一基准面或主基准面）上，最多可以约束 3 个自由度。如图 3-6 所示，这 3 个自由度为 Z 方向的平移，以及 X 轴和 Y 轴的旋转。为约束这 3 个自由度，至少为面接触，即至少 3 点接触这个平面。为了更可靠地定位这个零件，如零件不会在基准上因为接触面的不平整导致“晃动”，所以这个面（即 3 个支撑点围成的面）越大越可靠。更大的接触面保证了零件上的微观高点被量具上的基准模拟接触到，能更真实地代表这个零件特征，而且下次测量结果可重复。

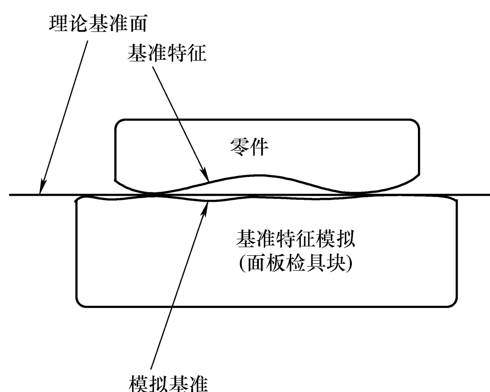


图 3-5　基准要素

主基准面最多能约束
3个自由度,为Z方向的
平移,以及X轴和Y轴的
旋转,至少为面接触

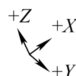


图 3-6　主基准面约束 3 个自由度



经过第一个基准面的定位，还剩下 3 个自由度没有约束。在图 3-7 中，第二基准面（又称为次基准面）最多可以约束 2 个自由度，分别为沿 Y 轴方向的平移和 Z 轴的旋转。实现这两个约束的最小条件是与第二基准面两点接触，即线接触。这个接触的线越长（两个点的跨度越大），这个零件的定位也越稳定，可重复性越高。

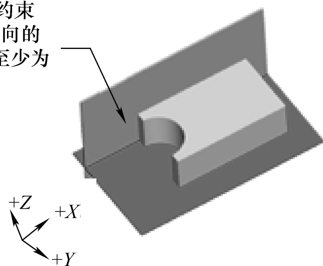


图 3-7　第二基准面约束 2 个自由度

经过第一和第二两个基准面的约束，还剩下最后 1 个自由度没有被约束，就是 X 方向的平移，第三基准面只需要一点接触，就可约束这个最后的自由度，如图 3-8 所示。

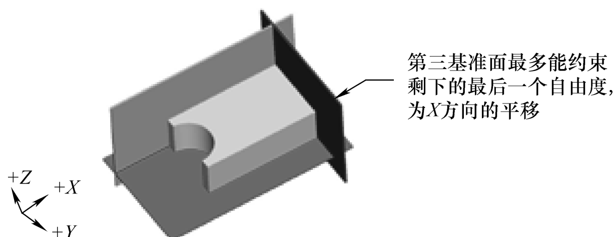


图 3-8　第三基准面约束 1 个自由度

所以只要保证第一基准面 3 点接触，第二基准面 2 点接触，第三基准面 1 点接触，就能保证零件的 6 个自由度完全被约束，也就是完全定位一个零件在空间中的状态。这就是 3－2－1 原则的原理，如图 3-9 所示。零件上的每一个点都有一个唯一的坐标值。零件上的其他特征都可以基于这三个坐标平面来建立。这 6 个接触点就是零件上的基准特征，相对于检具上就是基准支撑点，处于三个相互垂直的平面上。

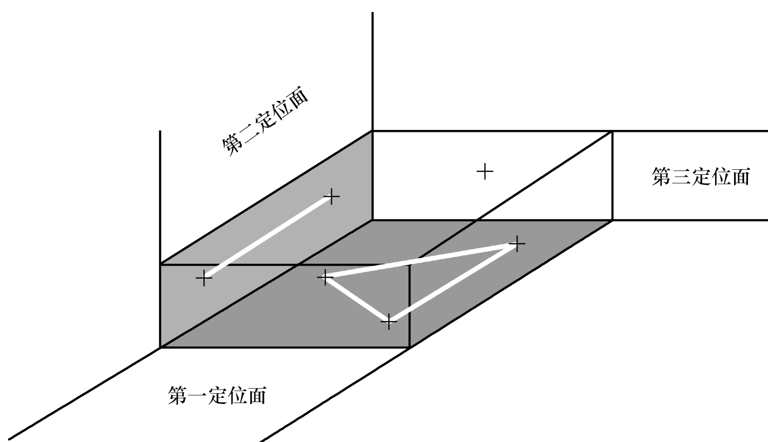


图 3-9　3－2－1 原则的原理

二、孔槽定位

在应用 3－2－1 原则时，很少的零件具有三个垂直的平面可用来定义为基准。经过大量

的生产实践，人们总结出了一个孔槽定位的方式来设置基准。图 3-10 所示是一个孔槽定位的示意图，这种定位也可以满足 3－2－1 条件，三个支持面 A_1、A_2 和 A_3 代表主基准面的 3 个定位，B_1 和 C_1 联合建立第二基准面，B_2 的水平方向定义了第三基准面。这个基准框架建立的坐标原点在主定位销的中心。

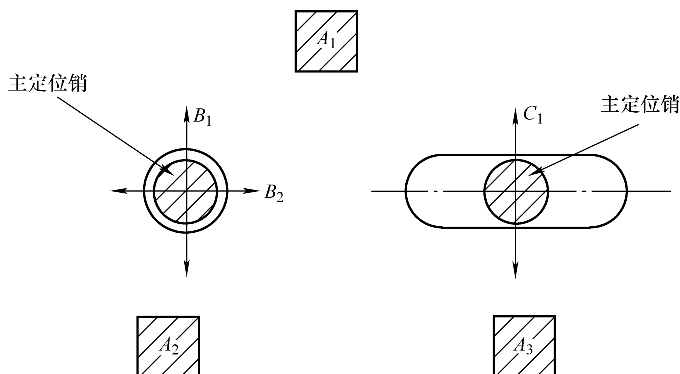


图 3-10　孔槽定位的示意图

在基准布置的时候，如果主基准的 3 个支撑不能稳固零件，或防止零件的下垂，通常可增加支撑点，所以基准 A 在实际应用中，可能为 3 个以上。同理，创建第二基准面的点也可以是 2 个以上。更多的点来创建基准面，会使测量或定位的可重复性更高，比如在三坐标测量中创建基准面时有 3 点以上的选择。

设置孔槽定位时，主定位孔应处于槽孔的中心线上。因为零件在加工时一定存在误差，主定位孔和次定位孔的连线距离上没有可以适应这个距离公差的间隙，造成零件卡在主、次定位销上，既破坏了零件也破坏了检具，同时造成测量的不准确，如图 3-11 所示。

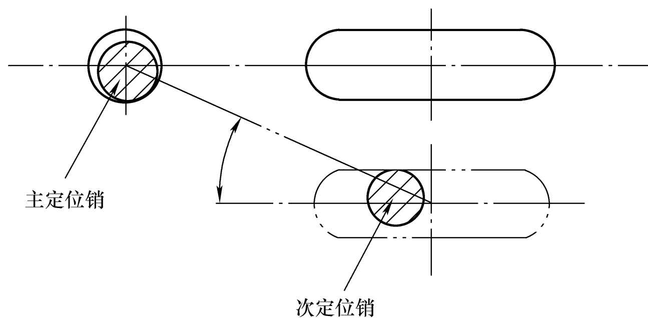


图 3-11　主、次定位销卡到零件上

另外，如果孔不在槽的中心延长线上，实际建立的坐标系如图 3-12 所示，产生坐标系的累积误差，造成测量结果的不准确。

但是，有时零件的结构限制了孔在槽的中心延长线上，不可避免地产生图 3-12 所示的这种情况。如果发生这种情况，将这个偏离角度限制在15°之内，也可以满足一定精度的可重复性要求。

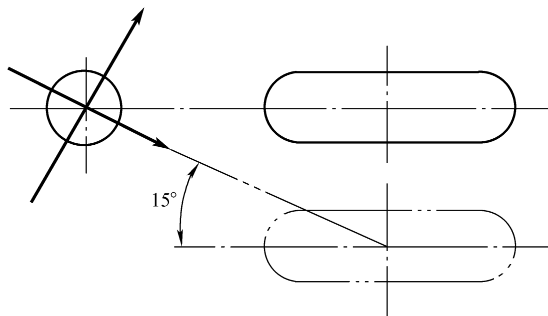


图 3-12　建立的坐标系公差累积变大



三、基准布置的深入探讨——基准阵列的问题

图 3-13 所示是一个微孔板，这个微孔板的应用目的是使用板上的微孔（EDM 加工）渗漏气体或液体，达到精确控制流量的目的。其加工方式是，先加工这个板上的四个安装孔，然后加工微孔。对于这个零件的 GD&T 设计，有不同的基准设置问题。图 3-14 所示是一个实际应用中的基准设置方式。我们先分析一下这两种基准设置方式，再按照实际需要选择合适的一种。

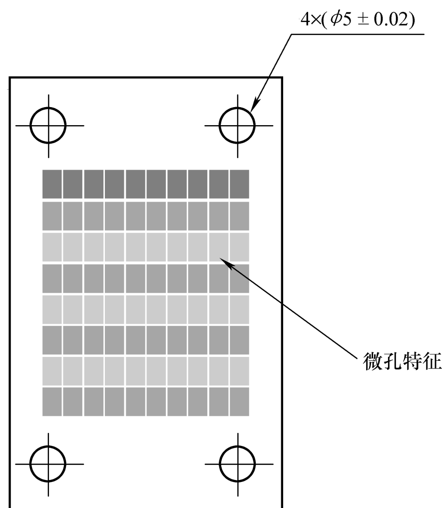


图 3-13　四孔阵列的设计

在图 3-14 中，设计者的意图是使用两个圆柱销作为基准销 *A* 和 *B*（零件的底面作为主基准面）来定位这个零件。

图 3-14a 所示的基准布置方式产生的坐标系如图 3-15 所示，零件上的所有特征都是以主基准孔中心为基础建立的。这里产生的一个问题是基准销 *B* 的设计，正常的次基准销应该是菱形销，限制图 3-15所示上下方向的自由度。这种方式符合3－2－1原则的基准定义条件。

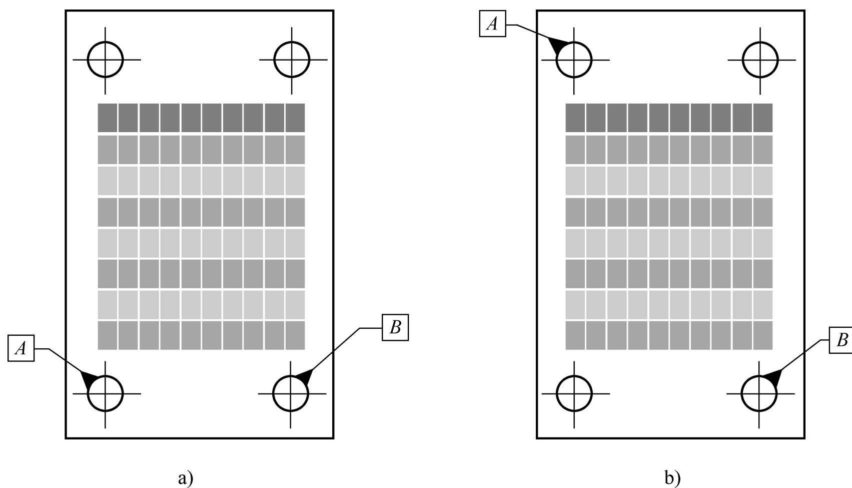


图 3-14　两种设置基准的方式

如果基准销 *B* 设计成圆柱销，其基准的设置方案如图 3-16 所示。所有零件上的其他尺寸都是以基准销 *A* 和 *B* 中间的轴线作为基准定位的。

图 3-16 中设置的坐标系与图 3-15 中完全不同，对于测量方案的准备有很大的影响。它们产生的效果，图 3-15 中的微孔阵列旋转方向的变差一致性较好，处于零件的中心位置偏差较大。图 3-16 中的微孔居中性较好，但是可能在旋转方向上的偏差一致性较差。因为图 3-16中实际上缺少一个自由度的约束，即旋转方向上的约束。零件在旋转过程中，基准销 *A* 或 *B* 会不确定地同零件上的基准孔接触，约束旋转自由度。另外，因为零件总是存在误差，

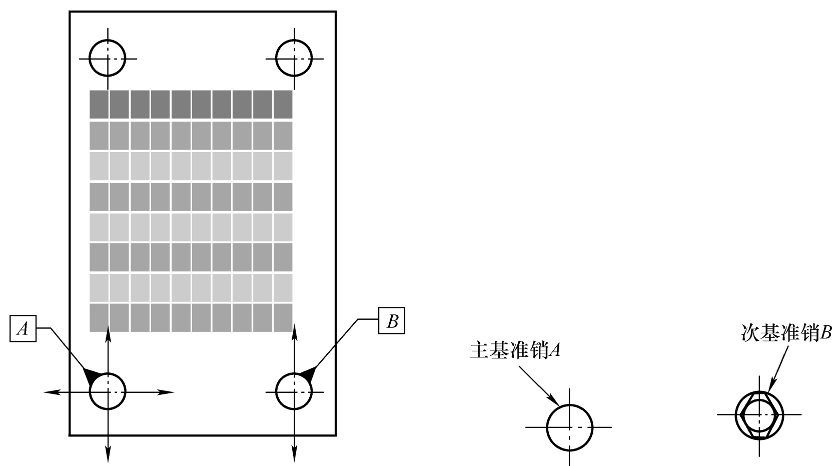


图 3-15　第一种方式的坐标系（B 为菱形销）

在销 A 和 B 插入的情况下，会产生卡紧的效果，会导致坐标系的变化，从而导致零件的测量误差。

如果确定基准销 B 为圆柱销（可能是因为菱形销的加工成本较高），也能取得与图 3-15 中一样的效果，可以将零件的基准孔 B 改为长圆孔，如图 3-17 所示。

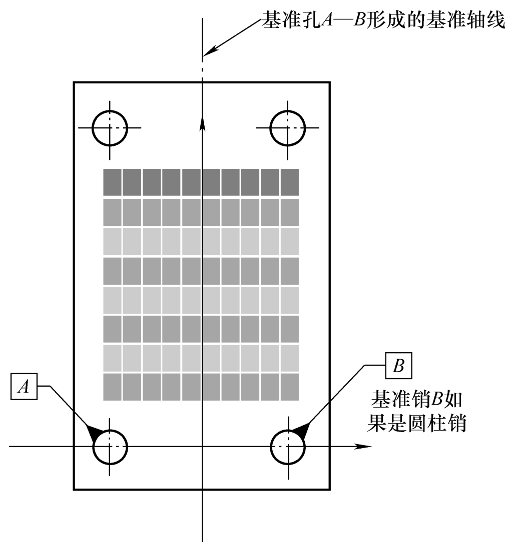


图 3-16　基准销 B 是圆柱销的情况

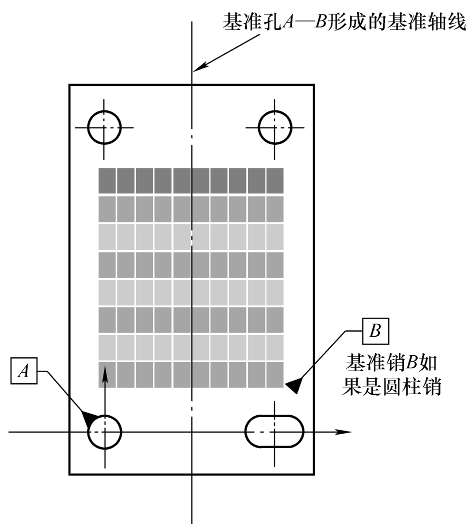


图 3-17　当基准销 B（长圆孔）为圆柱销时的设计

因为注意到基准的可重复性，A 和 B 的距离越大越好，于是会有采用对角线的定位方式，如图 3-18 所示。

图 3-18 中的定位方式确实比图 3-17 中的定位方式更为可靠，因为基准销 A 和 B 之间的线距离较长，但是其形成的坐标系也产生变化。这个零件的其他特征产生的效果是对零件的边缘有偏斜，但偏斜的一致性较好。

需要注意的是，基准 B 在这里是菱形销设置，如果使用圆柱销，并保证较好的定位，还是使用槽形孔。但容易发生槽形孔设置的错误。



按照图 3-19a 所示的设置方式，由于零件的误差，会产生零件卡紧在基准销上的情况，从而破坏基准定位。使用孔槽定位的方式，主基准销（或孔）中心应处在次基准销（或孔）的中心延长线上，或偏离角度在5°之内，以避免产生基准干涉现象，如图 3-19b 所示。

如果取对角线上的两个孔为基准，基准 *B*（长圆孔）需要按照对角线连线布置，以避免干涉，如图 3-20 所示。

图 3-21 所示是使用圆柱基准销的方案，这种方式的基准设置是以上所列方案中定位最可靠的。

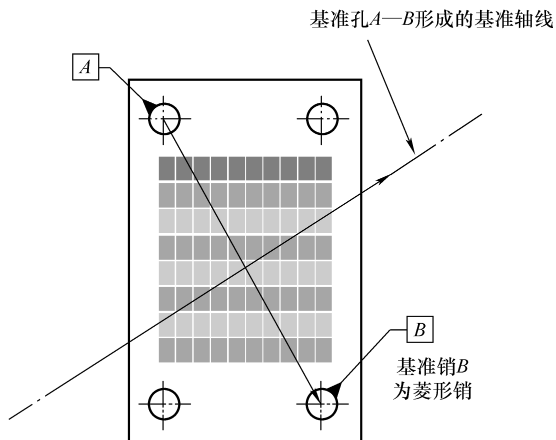
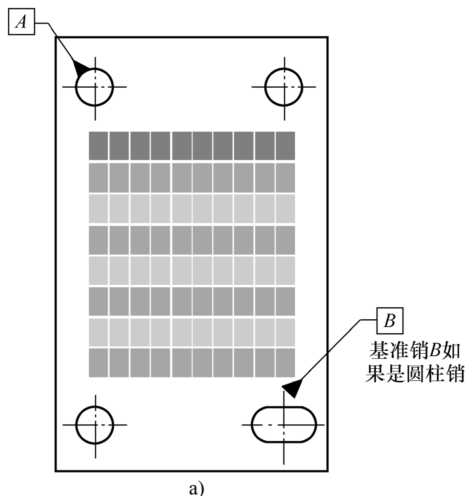
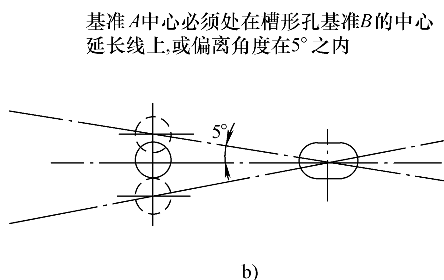


图 3-18　使用对角线的定位方式



a)



b)

图 3-19　基准 *B*（长圆孔）的设置方式一

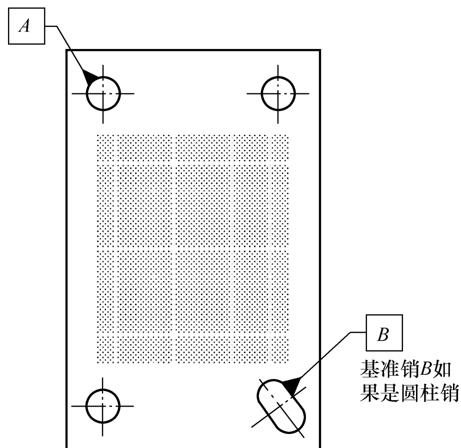


图 3-20　对角线设置基准的一种方式

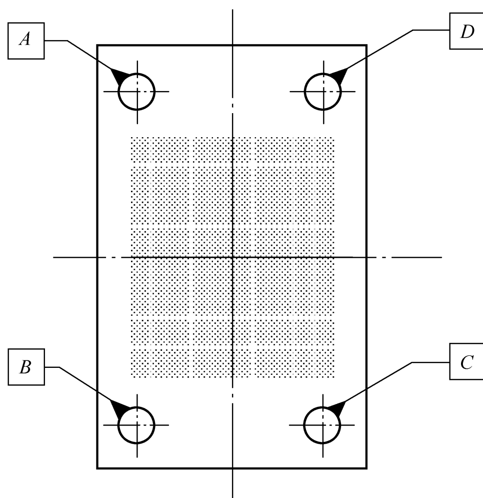


图 3-21　使用 4 个基准销定位

在设计这类零件过程中，有的工程师直接使用4个圆柱销作为基准。当直接插入4个基准销时，基准为基准销之间垂直的两条中心线。这种基准的设置使中间的微孔特征阵列有居中分布的倾向，但是在旋转方向上，这个零件的定位是不确定的，会导致可重复性的问题。如果4个孔的加工变差小（不会产生零件和基准销卡住的情况），可以使用这种定位方式。通常情况下不建议使用（4个基准销的成本大），因为以上的两销方式可以足够定位零件和加工出理想的特征。实际设计过程中，孔 *A*、*B*、*C* 和 *D* 需要有相互位置的控制。以上的基准控制方式可以按照实际的生产需要，选择成本低、定位可靠的方式设置。

图3-22中的基准销设置方式，基准 A_1、A_2、A_3、A_4 互为参考基准。这种设置方式，同时也检验了4个基准销的位置关系。在要求高精度的情况下，推荐使用这种方式设置基准。

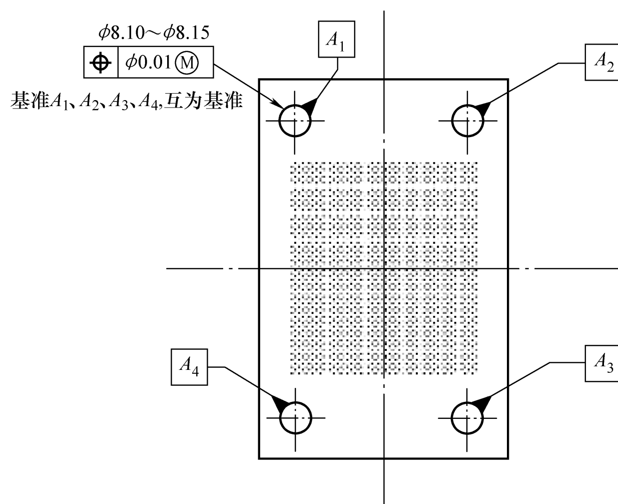


图3-22　4个基准销的设置方式

从以上的例子可以看出，在设置基准时有多种选择，不同的基准定义会产生不同的定位效果。选取基准的原则是在保证定位可靠（可重复性好）的情况下，成本最低。

以上讨论的都是基准孔是矩形排列的时候，汽车轮毂的安装孔也有相似的定位问题，但它是圆形孔的分布阵列，如图3-23所示。

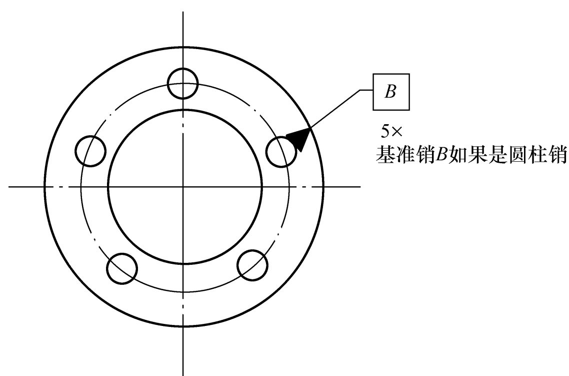


图3-23　轮毂中的圆形阵列孔的基准设置

这种方式定位的坐标系原点是轮毂的中心，其基准也是5个相互定位的基准销，这里的5个基准销只是检测使用的基准。考虑加工工艺，会用到上下轮缘的两个侧面和底面作为临时基准，再使用上下轮缘侧面和轮缘底面作为基准加工出轮毂表面和轮毂中心孔，然后使用中心孔定位精加工出轮毂表面和5个安装孔和气门孔。在轮毂的设计过程中要意识到工艺基准的设置。因为轮毂需要做动平衡以减少驾驶时轮胎的振动，所以会使用圆跳动的控制方式定义零件的其他特征，并且基准不能使用MMC的方式修正，只能使用RFS的方式修正。



轮毂的加工有时候考虑到轮胎的动平衡很难保证，会故意设置偏心的夹具，使轮毂的偏心产生稳定的偏差，以便平衡轮胎的动平衡偏差。其夹具的偏心有偏轮缘或偏中心孔两种方式。

四、基准要素

基准在应用时应注意以下要素：

1）基准是想象的，基准特征是实际零件上用来建立基准的特征。

2）基准的优先顺序（主定位、次定位和第三定位）是按照基准框中从左到右的顺序建立或模拟的，不是按照字母表排序的。

3）功能基准的选择严格按照它在总成中的功能，不是按照零件的加工要求（工艺基准)。而面作为功能基准，通常是由于它在总成中的匹配关系，或者是出于装配目的。

4）非功能基准（工艺过程中临时的基准）经常是出于加工因素而选择的。

5）模拟基准是检测中使用的一些辅助工具，如面板、检具块、高精度平行板、检具销和检具环等。它们在检测过程中与零件的基准特征接触，建立基准点、基准线或基准面，如图 3-5 所示。

6）基准的设置应该确保测量的可重复性，基准尤其是主基准需要形状公差来约束，如圆度、平面度等。

五、功能基准和非功能基准

功能基准是以装配为目的基准。非功能基准通常出现在工艺图样中，是加工时的临时基准，这些基准特征往往在下一道工序中被加工掉或被使用（如安装孔)。

基准在几何公差控制中非常重要。基准是点、线或面特征，由一个基准特征的理想几何轮廓产生。在检测中，这些零件上的基准特征如何同模拟基准特征接触是测量的重要要素。要清楚的是，基准是想象的点、线或面，是测量的起始点。虽然基准是想象的，但它们却由零件上的实际基准特征建立，这些模拟的基准精度要求高，通常为待测特征精度的 1/10。例如，一个想象的基准面是由适当的零件上的接触面建立的。一个想象的基准轴线是由零件上的直径特征建立的。设计工程师选择基准特征的目的是定义两个零件相应特征有功能关系（装配关系）的参考，或者说它们在总成中有一种功能关系，如匹配面。因此，对于相关基准的测量是对功能性的测量。

基准有三类，即主基准、第二基准和第三基准，这个分类源于它们的装配关系和功能关系。大多数情况下，主基准支撑零件，第二基准对齐零件，而第三基准用来限制零件的旋转。但这三个基准也不总是以这样的方式定义。一些情况，只参考一个基准，或者两个基准，或者三个基准全部应用。当三个基准都被定义引用的时候，基准参考框建立了三个相互垂直的基准平面。

基准就是用来约束自由度的。在这个约束下，形成确定的尺寸、特征或基准间确定的相互位置关系。加工者或检测者可以在这个基准框架下装夹工件，开始正确的加工或检测零件。

基准符号在图样上的标注方法如图 3-24 所示。注意，基准符号在不同的位置隐含的意义不同。基准特征符号用来指定一个零件上的特征。基准可以使用除了 I、O 和 Q 以外的所

有拉丁字母。

图3-24a、b所示零件的基准符号直接标注到特征面上或特征面的延长线上。

图3-24c所示零件的基准 *G* 是15mm的尺寸特征的两个外平行面的中心面，是一个虚拟的中心面基准。基准 *H* 虽然也是这个零件的中心面，但是基准的实现方式是10mm的尺寸特征的两个内平行表面形成的中心面。虽然两个中心面理论上是同一个，但是产品在制造过程中，总是存在误差，所以两个中心面实际上一定是两个不同的面。此种问题应该在设置工装或检具的时候格外注意。

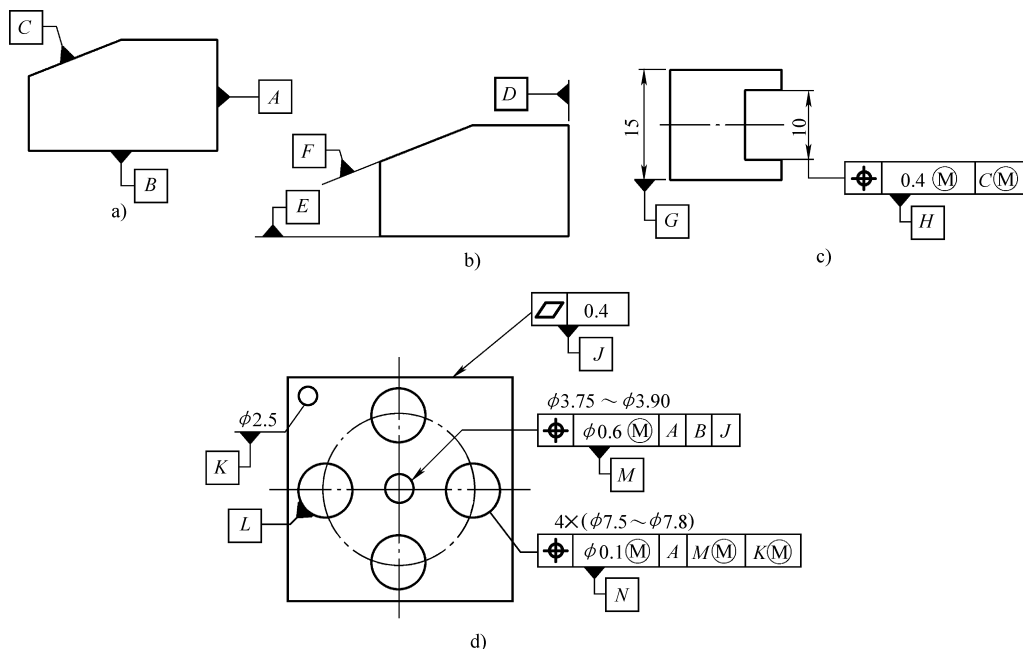


图3-24　基准的标注位置

a）轮廓线上　b）轮廓延伸线上　c）尺寸线上　d）引线上

六、联合基准

可以使用不止一个特征来建立一个基准，即联合基准，其表示方法如图3-25所示，是使用阶梯轴两端的圆柱面作为基准测量中间圆柱面跳动量的控制。为了保证测量的可重复性，规定基准 *B* 是使用全长的圆柱面，而基准 *A* 是使用至少30mm长度的示意区域的圆柱面模拟基准。

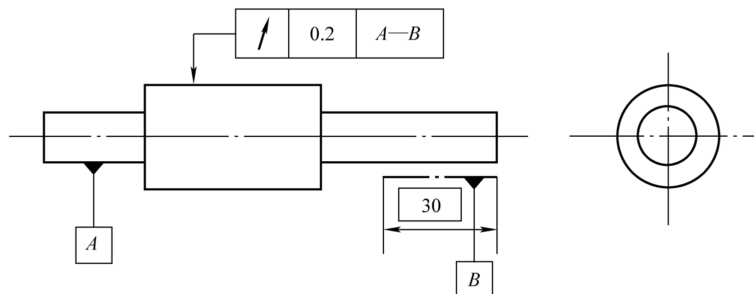


图3-25　联合基准

第四章　几何公差控制——形状控制

形状控制有四种方式：平面度、直线度、圆度和圆柱度。这四种形状控制方式都没有参考基准，除了控制轴线或中心面的特殊情况，都只能采用不相关原则（RFS）修正。形状控制用来评估特征与相应理想几何特征的差异［这些理想的特征为理想的平面、直线或圆（圆柱面）］。在评估形状公差之前，必须先确认受形状公差定义的特征是否在尺寸公差范围内。如果没有其他规定，每一个受控特征（拟合出中心线或面的特征）必须位于最大实体尺寸和最小实体尺寸边界之内，一个例外的情况是用直线度控制一个拟合的中心线或一个拟合的中心面的情况，我们稍后将详细介绍。

形状控制需要考虑包容原则与不相关原则，ASME Y14.5 和 ISO 1101 在这个内容上有差异，请详细参考后面的专门章节对于这方面的介绍。本文如果不做特殊说明，默认遵循 ASME Y14.5 的包容原则。

需要注意的是，一个特征首先要验证并通过尺寸公差，然后才能进行评估公差控制框内的形状公差定义。几何公差的法则一：如果没有其他规定，尺寸公差控制替代几何公差控制一个特征的形状。这个法则在形状控制中有效，尺寸公差可以取代几何公差的功能，用来控制受控特征的边界与理想边界的允许偏差。附加于尺寸特征的成形控制又进一步给出更紧的公差定义，当然这个公差带在尺寸公差定义的更大的公差带范围之内（相对于几何公差定义的公差带）浮动。拟合中心线或中心面的直线度控制通常需要更精确的、在尺寸公差范围内更紧的公差定义（通常称之为加严公差定义），也有直接使用尺寸公差定义的情况（通常称之为宽松的公差定义）。一些特征没有尺寸定义，也就没有尺寸来限定相应特征的形状变差，在这种情况下，就需要一些额外的定义要求，例如一个形状控制的公差控制框来限定这个特征与理想形状的变差。

面的形状控制要求所有受控面的元素或面的受控部分位于公差带之内。平面度的公差带是两个平行面之间的范围，圆度公差带是同心圆环之间的范围，圆柱度是两个同心圆柱面之间的范围，面的直线度的公差带是两条平行直线间的范围。圆度定义了组成圆面的每一个截面独立圆上的线元素的公差范围，同理，定义面的直线度为每一个组成这个面的直线特征独立定义了一个公差带。每一个面上的线元素必须位于本身的独立公差带内。拟合中心线的直线度的公差带为一个圆柱面，但是如果公差控制框中使用实效边界符号（最大实体或最小实体符号），受控的公差带是变化的，这取决于受控特征面的实际尺寸（如直径变小）。拟合中心面的公差带由两个平行面组成，同样，如果公差控制框中有实效边界修订符号，意味着公差带是一个变量，这个变化取决于实际尺寸特征的变化量。

面的形状控制（不包括中心线、中心面的形状控制）不允许使用最大实体或最小实体的修正符号，也不能使用直径符号（即使是圆度和圆柱度的控制也不需要，因为没有轴线上的控制），还有就是不允许有基准参考。从另一点来说，面的形状控制经常又来定义后续的基准特征，因为主定位基准特征是其他特征的基础。

下面将详细介绍平面度、直线度、圆度和圆柱度的定义，同时将列出实际的工程实例和

检测手段。

第一节　直线度的定义、应用及检测方法

一、直线度的定义

直线度是一种形状控制方法，无基准参考，可以用来定义一个面、中心线或中心面的视图方向上的线元素。

如果用直线度来控制一个面，那么相对于理想平面的偏差必须位于定义的尺寸公差限定的最大实体范围内。面的直线度控制框里通常只有直线度符号和一个几何公差值，没有MMC或LMC修正，也没有直径符号和基准特征符号。待检测的面必须做好定向设置，以去除做指示器移动全量（Full Indicator Movement，FIM）时产生的不平行因素。如果使用三坐标检测，必须给出最小的取点步长，得到尽可能多的有代表性的数据用来分析，以避免漏掉实际加工平面上有代表性的最高点。

如果直线度用来控制一个圆柱面特征形成的中心线或两个平行面特征形成的中心面，不管是否规定了MMC或RFS，MMC最大包容边界不再是实际的装配边界，整个特征（形成中心线或中心面的特征）的包容面可以超出尺寸公差定义的MMC尺寸边界，变差等于定义的几何公差值。如果符号Ⓜ出现在这种情况的公差控制框中，那么这个定义创建了一个实效边界（Virtual Condition）。这个边界经常用来决定匹配特征的尺寸和几何公差，在检测过程中需要注意这一点。

二、直线度控制一个平面

图4-1所示是直线度控制一个平面的例子，组成上表面的无限个线元素在视图方向上（前视图），每一条线都有自己的公差带，每一个公差带都是两条相距0.5mm的平行线，这组平行线以最小的距离和一定的空间定向倾斜度包容相应的线元素。每一个独立的公差带被定向于视图方向，也就是说这些公差带是沿着X、Y和Z轴的正交方向。根据包容原则，这个直线度不能超出尺寸（25±0.25）mm的要求。直线度控制在这里和尺寸控制是不相关原则（RFS），它们各自独立验证。通常先验证尺寸约束，再验证直线度约束。

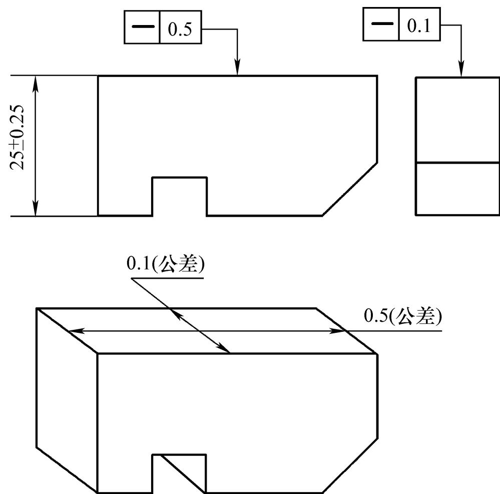


图4-1　直线度控制一个平面

直线度不约束面或线的位置，所以直线度公差不应该大于与其配合使用的尺寸公差，因为尺寸公差也定义了一个更宽的公差带，直线度公差带在尺寸公差带内可旋转、平移。如果直线度公差带大于尺寸公差带，就不再有控制的意义。

对于图4-1所示的例子，GD&T的包容原则要求被测尺寸不能超出最大实体的包容界面（设计的理想界面），如果采用ISO 1101的不相关原则，需要使用符号Ⓔ来定义为包容原



则。这个零件的最大高度（或高度方向最大实体尺寸）为 25.25mm，并且在每一个截面上的尺寸不能小于 24.75mm。检测时，零件能够通过最大实体尺寸定义的零件长度的通道（通规），并且，零件的每一个截面尺寸不能小于最小实体尺寸 24.75mm。其原理是最大实体尺寸边界保证了装配的边界，而最小实体尺寸保证了零件的强度。直线度在这里不会改变零件的尺寸公差约束的最大实体尺寸和最小实体尺寸，如图 4-2 所示。

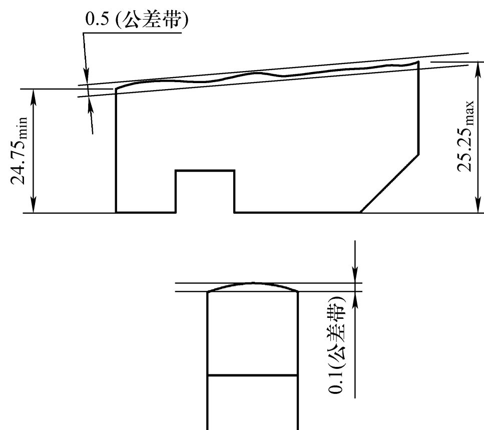


图 4-2　平行度控制的最大实体尺寸和最小实体尺寸

直线度控制一个平面的要点如下：

1）公差带是两条平行线。

2）无参考基准。

3）直线度公差小于相应的尺寸公差。

4）实效边界就是 MMC（高级应用，后续会详细介绍）。

5）直线度可以应用于一个非平面（如圆柱面或直线扫描而成的曲面）的表面控制，不能控制零件的平面度。

三、直线度控制一个圆柱面

图 4-3 所示的圆柱面是由纬线组成的，这些纬线必须位于一个公差带范围内（这个例子是 0.1mm），这个公差带形状是两条平行的直线。同时这个公差带不影响尺寸定义的最大实体尺寸和最小实体尺寸。在本例的直线度控制圆柱面特征下，实际圆柱面可能产生鼓形、腰形或弓形。圆柱面特征应先满足 MMC 的最大实体边界，然后再验证每个圆柱面纬线的直线度公差。

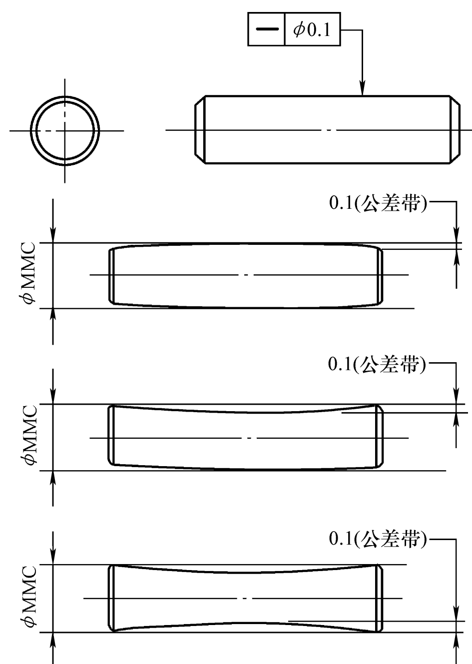


图 4-3　直线度控制一个圆柱面

图 4-4 所示是使用直线度控制一个特征的中心面的例子，注意没有直径符号。

在图 4-4 中，这个直线度公差带 0.2mm 小于尺寸公差带 0.5mm。注意这个受控特征的最大实体尺寸为 28.50mm，最大包容边界是 28.70mm = (28.5 + 0.20) mm。

直线度控制中心面的要点如下：

1）公差带为两个相距规定公差值的平行面。

2）在 MMC 修正下可以获得补偿公差。

3）在公差不相关原则（RFS）修正下，公差为固定值，无公差补偿。

4）直线度公差要小于尺寸公差。

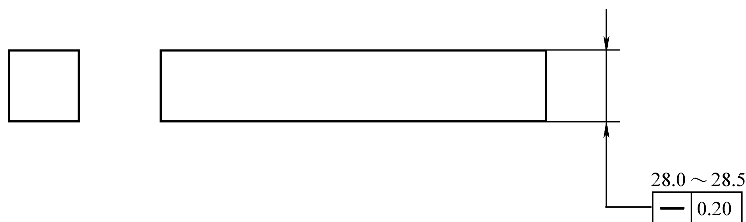


图 4-4　直线度控制一个特征的中心面

四、直线度控制中心线或中心面

图 4-5 所示是一个外圆柱面拟合中心线的直线度控制，公差控制框中有一个直径符号，定义了一个公差带是以拟合中心线为轴线、直线度公差值为直径的一个圆柱面公差带。要注意，如果是一个拟合的中心面，则没有直径符号，这时的公差带为两个平行面。无论是由圆柱面特征拟合的中心线，还是由两个平面特征拟合的中心面，都可以用 MMC 修正。根据几何公差的第二法则，如果公差框中没有任何修正符号，那么即默认为尺寸不相关原则（RFS）修正。一些检查分析经常需要特征轴线和中心平面的辅助来稳定测量的稳定性，相对面可以是桶形或腰形，但是不会影响拟合中心线或面的直线度。所以圆柱面特征的稳定性要优于单平面特征的定位。

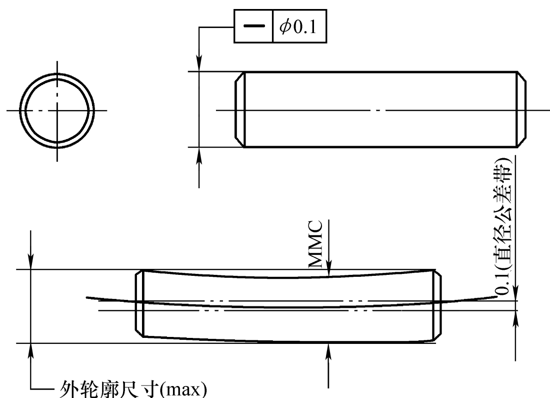


图 4-5　直线度控制一个圆柱面

注意图 4-5 中这个直线度控制的是这个圆柱面的轴线，而非圆柱面特征。这个标注影响了整个零件的配合轮廓尺寸。这是唯一的一种形状公差可以补偿尺寸公差的例子。

这个例子中，圆柱面的实际轴线必须位于规定公差值为直径的圆柱面公差带内（这里是 0. 1mm 直径的公差带）。圆柱体特征的每一个截面必须位于尺寸公差规定的最小实体尺寸界限内。所以：

包容边界尺寸（装配边界）＝实际特征尺寸＋直线度公差（RFS 修正下）

包容边界尺寸（装配边界）＝最大实体尺寸＋直线度公差（MMC 修正下）

检测者的检测方案将不是一个卡尺就能够完成的，因为需要验证这个零件的包容边界，对于 RFS 修正的中心线（面）直线度，其配合尺寸（最大包容边界）为实际的零件尺寸加上轴线的浮动量（直线度）。实际生产中，不同的加工零件有不同的最大包容边界。对于 MMC 修正的中心线（面）直线度，其配合尺寸（最大包容边界）为零件的最大实体尺寸在最大实体尺寸（理想边界）的浮动量（直线度）。

直线度的应用取决于匹配、形状要求和零件的功能。例如，在间隙配合设计时，一个轴和匹配零件在总成中完成间隙配合。这种情况只关心轴可以装配入匹配零件。如果要求轴线的直线度，那么轴的配合边界（即实效边界）受控，比较装配特征的边界条件，确保产生需要的配合间隙。这种情况属于控制轴对外形的控制。另外一种情况是过盈配合或过渡配



合，当轴与配合零件有接触，或者需要过盈配合时，要求轴的表面直线元素的直线度提高，以达到更多的接触面，这样也就是约束轴的鼓形、腰形和弓形到直线度允许的范围内。

直线度控制一条轴线的要点如下：

1）轴线的直线度公差带是一个规定公差值为直径的圆柱面。

2）在 MMC 修正下，这种情况是一个直线度公差可以补偿尺寸值的特例，另一种可以获得补偿公差情况是中心面。

3）轴线的直线度没有控制轴的面的线元素，但面的线元素的直线度却控制了轴线。

4）可以使用属性检具，即最大实体尺寸的直线度时的配合边界。

五、直线度的测量及应用

直线度可以做两方面应用，一是面控制，二是对拟合的中心线或中心面控制。在这两种情况中，特征控制框需要标示在受控的面在视图中显示为一条直线上。

当控制一个面时，如一个平面，公差带是由两条平行线组成的。两条组成公差带的线必须是理想的直线，且相距公差框中规定的直线度公差值的距离。相应面上的线元素必须位于这两条线内。对于曲面上的纬线的直线度，公差带也是相距直线度公差值的两条理想平行线，且这两条平行线位于这个垂直于曲面切线的平面上。

图 4-6 所示为一个锥台的直线度定义及测量设置。这个直线度控制应用于每一个视图方向的线元素，并且相互独立设置（每次测量一个线元素，千分尺归零设置）。每条线的公差带是两条相距 0.1mm 的平行直线。

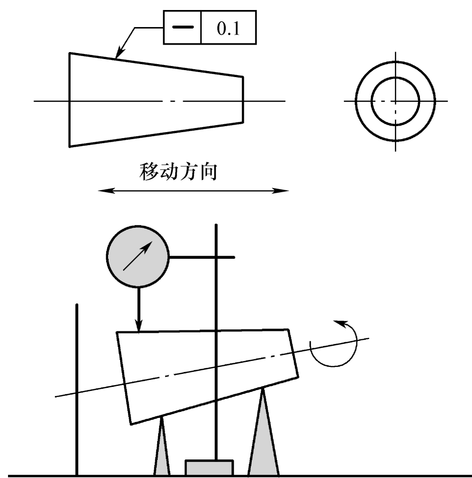


图 4-6　直线度的定义及测量设置

检测的设置要求是线元素尽可能地与测量台面平行，然后沿视图方向滑动高度千分尺，千分尺上的每一条线的读数不能超出 0.1mm。这个直线度也控制约束了锥体上沿视图方向上的表面粗糙度。

一个面上的直线度公差带是无限多的。每一个线元素都是独立的，且位于各自独立的公差带内。每条线的测量都需要重新归零。如果一个线元素检测通过，则旋转零件，进行下一个线元素的测量。继续这样的操作，直到检测完最后一个线元素。

当用来控制拟合中心线或面时，尺寸特征和公差带的形状完全不同于对面直线度控制的情况。对于拟合中心线或面的直线度公差控制框，无论有无 RFS 或 MMC 修正，公差控制框都要联合显示尺寸，通常位于公差控制框的上方，连接到尺寸线的延长线上，如图 4-7 所示。

如果使用圆柱面特征的拟合中心线的直线度控制，必须使用直径符号，而对于拟合中心面就不适宜使用直径符号了。如果使用了 MMC 修正，要注意实效边界（Virtual Condition），即装配边界；如果没有使用 MMC 修正，则默认为 RFS 修正。

如图 4-8 所示，直线度用来定义一个拟合的中心面，不使用直径符号。如果应用最大实

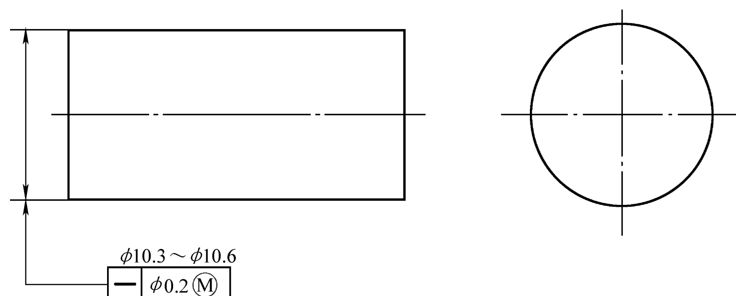


图 4-7　直线度控制一个圆柱面的实例

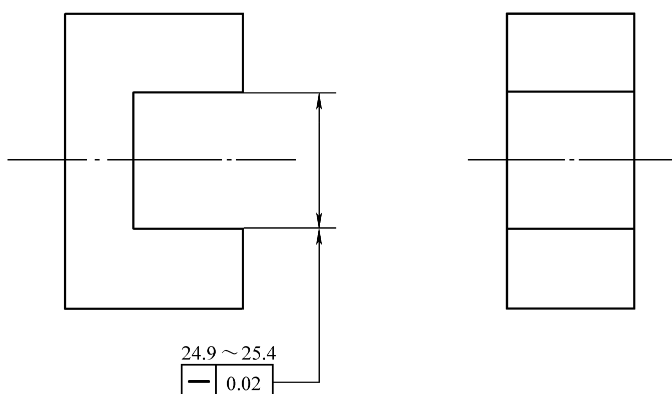


图 4-8　直线度控制一个中心面的实例

体修正条件（MMC），意味着设计者允许，当尺寸公差向最大实体尺寸变化时（由 24. 9mm 变化到 25. 4mm），直线度可以从尺寸公差中得到补偿。如果没有应用 MMC 修正，说明此控制应用 RFS 原则（几何公差第二法则）。

如果拟合的是中心线，它的公差带是圆柱面，圆柱面的轴线即为理论特征轴线。受控的实际特征面的拟合中心线必须位于这个圆柱面的公差带内。这个拟合的中心线由受控的特征面产生，这个特征面在实际加工过程中可能产生弯曲或其他变形，但其中心线绝不能超出这个公差带（但是当公差控制框中有符号Ⓜ修正时，这个公差带是随实际的尺寸加工公差变化的，也就是说可能这个直线度的公差带变大）。MMC 修正下的直线度公差 = 直线度公差 + a，其中，a 为特征的最大实体尺寸减去实际加工尺寸的差。而在实际生产过程中，特征的加工尺寸都会小于最大实体尺寸，所以每一个公差带的直线度如果使用 MMC 修正，都会有一个相应量的增加，这也是 MMC 修正的意义，将容易加工检测的尺寸公差补偿难以加工检测的几何公差，达到节省成本的目的，所以图 4-8 中的理想尺寸是 25. 4mm（可以获得最大补偿），而不是 24. 9mm。

所以由尺寸公差产生的最大实体包容界面就不再有效，不必担心这个直线度控制的面元素超出尺寸公差定义的最大实体包容面的情况。拟合的中心线或面的直线度创造了新的一个界面，这才是不可以超出的新边界。在 MMC 原则中，这个新的边界由尺寸的最大实体特征和直线度合并创建。

外部特征（如轴、销类）的这个边界 = MMC + 直线度公差

内部特征（如孔、槽等）的这个边界 = MMC − 直线度公差



这个最有意义的边界常被用来确定最差的匹配尺寸，或者是用于检具销的尺寸计算。

遇到这种情况，尺寸仍然需要独立验证，不管是 MMC 修正还是 LMC 修正，检测要求相同，都要测量每一个断面的直径方向（圆柱面特征）上的两点或相对点（矩形特征）。在这些断面上的尺寸特征验证完毕并合格的情况下，才能开始下一步直线度的验证。如果这个受控特征有 MMC 修正，可以使用功能检具来检验，检具的尺寸设计要遵守这个特征的最差匹配尺寸，即上面讨论的实效边界。如果受控特征是一个外部特征（如轴、凸缘、凸台等），那么检具就是内部特征（如孔、销孔、环形孔或槽等）。当然一个内部特征会有一个相同轮廓的外部特征检具。

图 4-9 所示是当轴线的直线度公差由 MMC 修正，在不同的实际加工尺寸时，轴线的实效边界的计算，检具设置和补偿公差计算如图 4-10 所示。

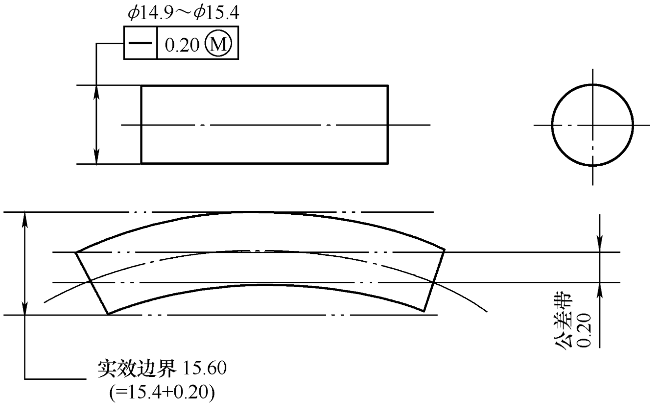
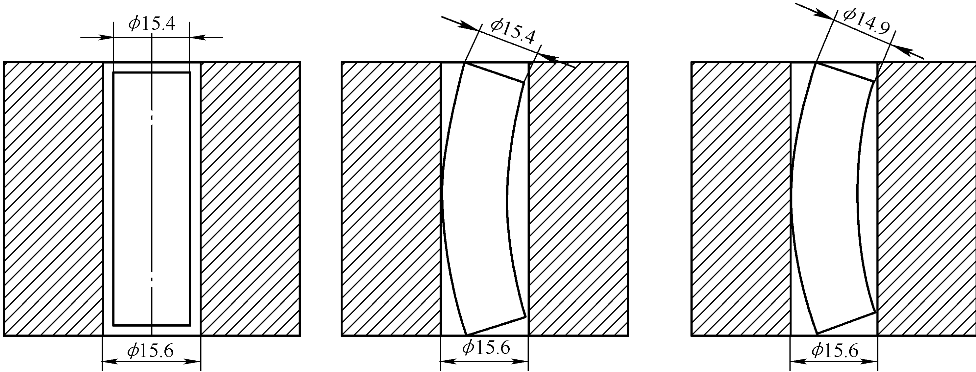


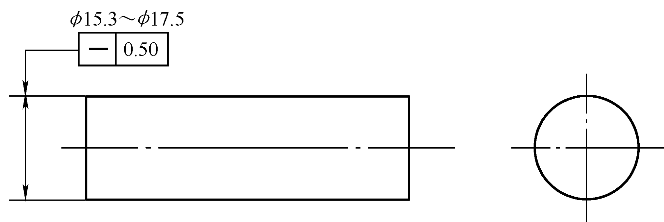
图 4-9　MMC 修正的直线度控制



尺寸	计算公差
ϕ15.4	ϕ0.20
ϕ15.3	ϕ0.30
ϕ15.2	ϕ0.40
ϕ15.1	ϕ0.50
ϕ15.0	ϕ0.60
ϕ14.9	ϕ0.70

图 4-10　MMC 修正直线度补偿公差的计算

图 4-11 所示是当轴线为 RFS 修正的直线度公差时，轴在不同的实际加工尺寸时对应的直线度公差。



尺寸	计算公差
ϕ17.5(MMC)	ϕ0.50
ϕ17.2	ϕ0.50
ϕ17.0	ϕ0.50
ϕ16.5	ϕ0.50
ϕ15.5	ϕ0.50
ϕ15.3(LMC)	ϕ0.50

图 4-11　RFS 修正的直线度公差计算

六、拟合中心面的直线度

拟合中心面的直线度的公差带，是以受控特征的理想中心面为对称面，相距距离为给定直线度公差值的两个平行面间的距离。受控特征产生的中心面必须位于这个公差带之内。拟合的中心面由受控特征断面上的相对点产生。

拟合的中心面可能有弯曲或其他变形，但是不能超出两个平行面包容的公差带范围。当使用 MMC 修正时，这个公差带是一个变量。

当使用 MMC 修正时，受到补偿后的最终直线度公差值 = 直线度公差　+　实际尺寸与 MMC 尺寸的偏移量。因为在实际生产过程中，所有加工尺寸必然小于 MMC，所以这个直线度公差总会得到来自尺寸公差的补偿，直线度公差带就会变大。LMC 也同样遵循这个规律。

七、RFS 修正情况下的直线度及检测设置

如果需要进行拟合中心面和中心线的直线度控制，且是尺寸不相关原则（RFS），则检测这个直线度会消耗很多工时，也就是说检测成本很高，无法实现 100% 的检测。对于检测流程，无论是圆柱面特征（拟合中心线）还是非圆柱面特征（拟合中心面）都是相同的。同样地，检测者只有对测量平台设置非常有经验，才能探测到待检特征的实际情况。

建议将每一个断面上的偏差记录到一个表格中，这样整个拟合中心面的直线度就有一个比较直观的显示。此时的公差带宽度为公差控制框中的公差值（也就是两个平行面之间的距离）。

图 4-12 中显示了一个中心面控制的要求，公差控制框中出现了配合尺寸公差。几何公差控制为直线度符号，然后是几何公差值和一个隐含的 RFS 修正，即尺寸不相关原则。

直线度的公差带是两个理想的平行面，要求所有的拟合中心面上的元素必须位于其中。



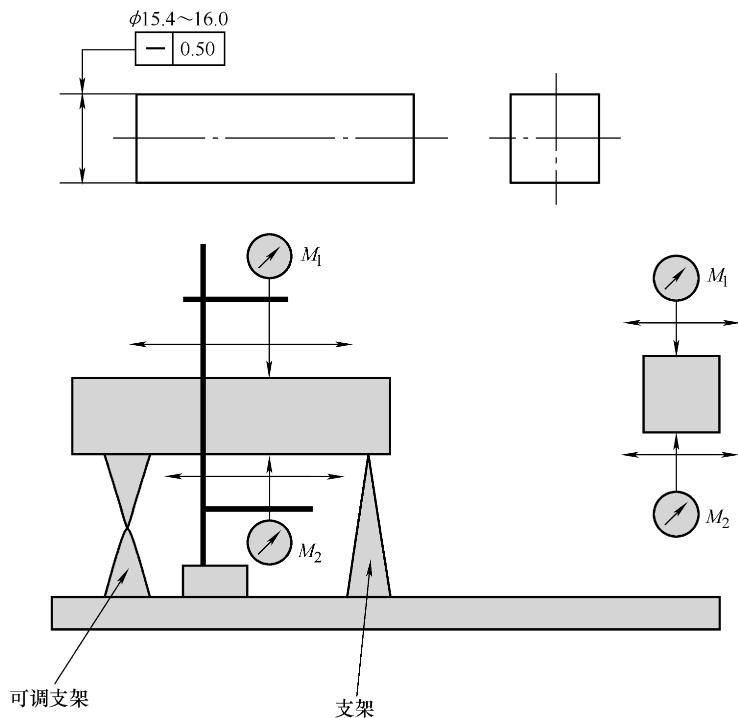


图 4-12　直线度测量设置（中心面）

所有的拟合面都可以由图 4-12 中的设置方式测出。这些中点可以通过每一组 180°方向上的相对点求出。图 4-12 中的检测器具包括可调支架、支架、检测台面和千分尺。两个千分尺可以读出数据 M_1 和 M_2，比较之后就可以求出中点。千分尺的读数可以看作是从检测台面到特征面的高度。当求出中点后，应当将这个点描到图表上。这样求出足够多的点，形成一个中点图谱。然后这个图谱就可以用来评估中心面是否满足 0.50mm 的直线度公差范围。

合格的中心面必须使所有元素都位于规定的公差带范围内。既然没有 MMC 或 LMC 修正，那么就没有补偿公差。但是如果应用了材料相关原则的修正，就要注意公差带是一个随实际尺寸变化的公差带。直线度可以得到尺寸公差带的补偿，因此可以降低成本。

图 4-13 显示了拟合中心线的控制，特征控制框同尺寸公差联合使用。几何公差框中包含了直线度、直径符号和几何公差值，并且由 MMC 修正。

图 4-13 中零件的直线度公差带是一个理想的圆柱面，是一个变化的量，实际特征的拟合中心线必须包含于内。这个轴的公差带直径在 MMC（ϕ16.00mm）时为 ϕ0.05mm。测量时实际特征的拟合中心线可以通过求一组直径方向上两点的平均值来评估。这个测量的设置方式是使用中心孔定位器和千分尺来求的。通过比较千分尺的两个读数 M_1、M_2 来求取，也就是测量面板到特征面的高度。通过多次反复测量，可以得到足够多的特征面上直径方向上的相对点，将这些点描到刻度图上，就可以进行相对来说比较精确的直线度公差评估。

首先，先建立特征的端部轴线端点。图 4-13 中的轴使用了中心定位孔的方式。在车床上，轴的两端要尽可能地夹紧，以减少进刀时的变形，这样加工后的特征端部的质量很高，

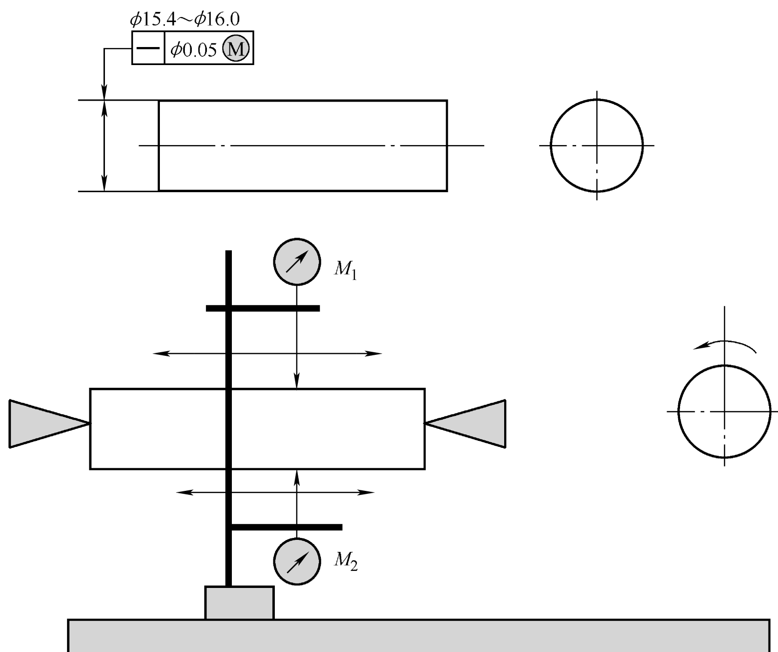


图 4-13　直线度约束的测量（中心线）

也就保障了中心孔的精确性。中心定位孔也不能受力太大，否则会导致轴的变形，产生偏心，从而导致中心定位孔的不精确。

这些锥形的中心定位孔既可以用来作为机加工的基准，也可以用来作为检测时中心基准的建立，并且，加工者可以直接在车床上测量这个轴，而不需要取下。这样做到了加工和检测的基准统一，这是基准设置的一个原则。其好处就是可减小基准变换产生的累积误差。

八、对于腰形或鼓形特征的直线度测量

一旦建立了测量台架，圆柱面特征应该在静态情况下，由有读数的千分尺从一端到另一端划扫圆柱面特征的表面。测量者可以读出每一个断面直径方向上的一组数据，比如：0.00mm，+0.05mm，+0.10mm，+0.05mm 等，如图 4-14 所示。

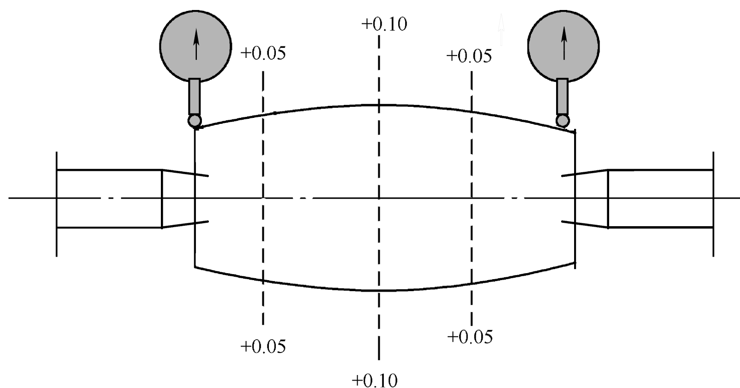


图 4-14　鼓形特征的直线度测量

然后，轴应该旋转 90°，进行同样的测量，记录纬线方向上直线度变化量的值。当完成



测量后，轴再进行旋转，测得其他断面上直径方向上的每组对应点的值。最终结果需要通过评估这些点的值来取得。

图 4-15 所示是腰形特征直线度测量的情况，并且给出拟合中心线半径的变差分布。因为两点超出 ϕ0.05mm 的直线度要求，故这个轴需要拒收或重新加工。

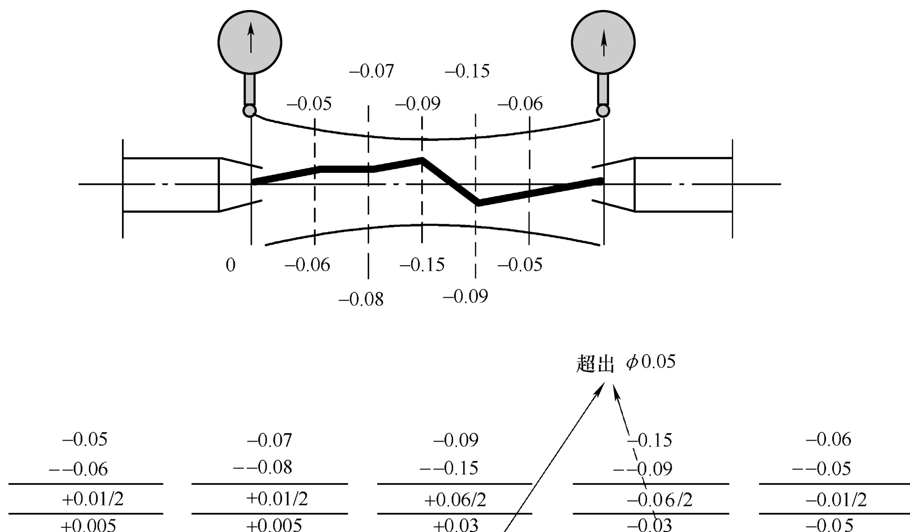


图 4-15　腰形特征直线度测量的情况

拟合直线度单位长度上的直线度要求可以用组合公差框的方式求得。这种定义方式经常使用，用来指明是单位长度上的要求而不是全长上的直线度控制，是一种非常实用的直线度控制应用。

例如，图 4-16 所示为直线度的两种控制方式。

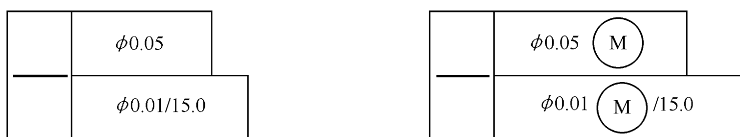


图 4-16　直线度的两种控制方式

图 4-16 中的定义可以防止中心线在全长上和局部的直线度波动。第一行公差控制框定义了一个 ϕ0.05mm 的圆柱面公差带，第二行公差控制框定义了一个长 15mm、ϕ0.01mm 的浮动圆柱面公差带。ϕ0.01mm 的圆柱面公差带可以在 ϕ0.05mm 的圆柱面公差带里平移、旋转。这个例子可以应用 MMC、LMC 或 RFS 来修正。如果使用 MMC 修正，那么可以使用功能检具检验全长和单位长度上的直线度（分别由两个检具完成）。

在有 MMC 修正的情况下，第一行公差框可以使用功能检具的规格是：检具长为特征的最大长度，内径为轴特征的实效边界尺寸，这个例子是 MMC +0.05mm。这个尺寸是理论尺寸，实际上无法加工出来，需要考虑 10% 的磨损和加工误差。

在有 MMC 修正的情况下，第二行直线度公差框可以使用功能检具的规格是：最小设定的单位长度，这个例子是 15.00mm，内径为第二行公差框定义的实效边界尺寸，这个例子是 MMC +0.01mm。

当尺寸特征在 RFS 修正的情况下，需要使用千分尺来进行直线度的测量，设置如图

4-12所示。

第二节　平面度的定义、应用及检测方法

一、平面度的定义

平面度是形状控制，理想的单一连续面上所有的元素点必须位于同一平面上，不应用参考基准。平面度公差带由两个平行平面组成，所有受控的被加工特征必须位于这个公差带之内。平行度应用比较广泛，主要用于主定位面的定义，作为建立其他两个基准面和其他零件尺寸特征的第一平面。对于定义一个能够保证配合平稳的装配面是非常有效的控制方式。平面度也用来控制一个平面的表面粗糙度。

公差控制框通常由一个平面度符号和一个几何公差值来表示。一些情况也用两行组合公差框来定义。第一行公差框用来定义一个全域的平面控制，而第二行公差框定义了一个加严的平面度公差控制，其公差带只能浮动于第一行公差框定义的两个平行面公差带之内。例如，需要定义一个加严的相对小的区域的公差变量。下面的例子是定义了一个平面度控制，整个面的平面度要求为0. 5mm，并且在每个25mm×25mm的方块内平面度的要求为0. 2mm，如图4-17所示。

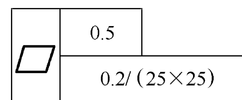


图4-17　平面度的控制方式（一）

通常来说，平面度公差带控制框如图4-18所示，它包含的意义是整个受控面必须位于一个全域的相距为0. 5mm的两个平行面公差带内，这两个平行面在空间中没有方向、位置的要求，是能够包容待测特征平面上所有点的最小距离的两个平行面，类似于三坐标测量值评价中的最佳拟合方式。应注意的是，特征的尺寸定义先于平面度检查，且独立验证。根据几何公差第一法则，平面度通常是用来对尺寸公差隐含的平面度定义的一种加严控制。因此，对于刚性物体，平面度公差框内的公差值必须小于定义这个特征面的尺寸公差。

平面度是一种形状公差控制方式，用来比较实际零件表面与设计的理想面之间的变差。现实中的零件表面是有缺陷的（如凸凹不平）。因为平面度不像平行度和垂直度可以约束另一个面来确定平坦的程度，没有基准可以参考，所以当使用可读数的指示器来做全平面的扫描检测时，得到的数值是相对工作台面的结果，这是一个平行度的测量，虽然检测合格的零件也可以使用，但不是要求的平面度检测。因此，要研究一下零件的检测设置。

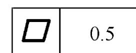


图4-18　平面度的控制方式（二）

一种测量设置方法是使用夹具同时夹住零件的上、下表面，且夹具能够调整受控上表面平行于检测台面，直到受控面尽可能平行。可以使用高度千分尺指针接触受控面并且扫描特征面来检查是否合乎要求。此时变差必须小于或等于公差控制框中的公差值。

平面度测量时需要做指示器移动全量（Full Indicator Movement，FIM），即一次设置的指示器全表面检测。平行度不能使用属性检具检验（通止方式），必须是数值型的检测工具。

因为测量和加工一样，无法达到理想的检测，比如不可能测量一个面上所有的点来验证平面度，所以工程上通常使用直线度检测来替代平面度，这需要设计者给出一个面上能保证平面度功能的几条直线的直线度来替代验证平面度，或由检测者选取平面上具有代表性的几条直线来验证平面度。要注意，有可能实际平面度会超出检测的直线度公差。



平面度的应用如下：

1）可以作为装配面的参数设定控制。

2）用于基准面的定义，比如作为零件第一个特征的主基准面的定义。

3）确保密封面的参数满足密封功能。

4）进行密封面的维护。

平面度的应用要素如下：

1）受控面必须完全处于给定公差值的平行面内，所有面上的点都应该处于尺寸限度范围和平面度范围内。

2）平面度公差必须小于相应的尺寸公差。

3）不能使用基准参考。

4）应用尺寸不相关原则。

5）无法使用属性检具检验，必须使用数值型测量工具。

6）平面度的检测要注意测量的取点具有待测平面的代表性，能够容纳这个平面的最大波峰和最低波谷，以确保这个公差带的可重复性。

7）平面度不能应用于不连续的平面，不连续的面意味着这些平面互为参考基准，与平面度不参考基准的逻辑法则相悖。通常使用轮廓度来控制不连续的平面。

二、平面度控制一个平面

图 4-19 所示是平面度控制一个平面的应用例子，图中平面度同尺寸公差联合定义零件的上平面特征。平面度的公差带是间距 0. 1mm 的平行面，这个平面度公差带可以在 0. 5mm 的尺寸公差带区间浮动。这个零件的最大高度是 25. 25mm，每个截面的高度不能低于 24. 75mm，不参考基准。0. 1mm 的平面度公差带按照 GD&T 的包容原则，不会破坏零件的最小实体尺寸 24. 75mm。在 0. 5mm 的尺寸公差带内，这个平行面公差带可以平移和旋转，等同于表面粗糙度控制。

三、几何公差第一法则与平面度控制

在 ASME Y14. 5 的第一法则中，尺寸公差可以控制特征的形状（直线度、平面度、圆度和圆柱度）。这也是 GD&T 中的包容原则的要求，就是零件的最大实体尺寸为理想边界，即零件在最小实体时对应的是相应的形状公差值，当零件从最小实体尺寸变化到最大实体尺寸时，形状公差相应变小。这个最大实体包容边界也是装配边界。如果是独立原则，需要使用符号Ⓘ修正。

在 ISO 8015 中也有包容原则的定义，解释的方式与 ASME Y14. 5 相同，只是在标注方式上有区别。ISO 中使用符号Ⓔ表示包容原则，默认为独立原则，也就是在默认情况下的最大包容边界需要加上相应的形状公差。

图 4-20 所示是按照几何公差第一法则定义了两个相对应平面的中心面的平面度。平面度在 0. 04mm 的公差带内。这个 0. 04mm 的平行平面公差带位于固定的尺寸公差 0. 11mm（=16mm－15. 89mm）定义的平行面公差带内（包容原则，尺寸公差控制形状公差－平面度公差）旋转或平移。

这两个平面特征的中心面上的单个波峰波谷不能超出 0. 04mm 的范围，并且整个面的全

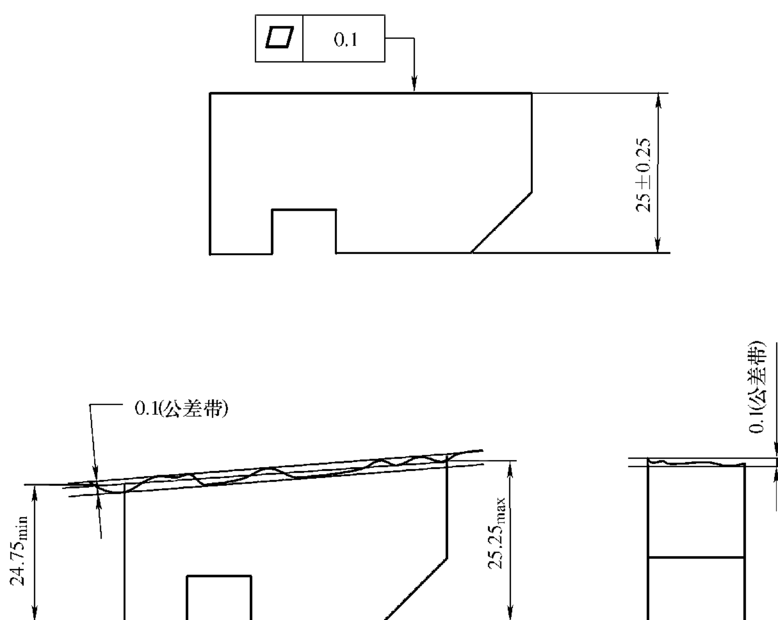


图 4-19　平面度控制一个平面

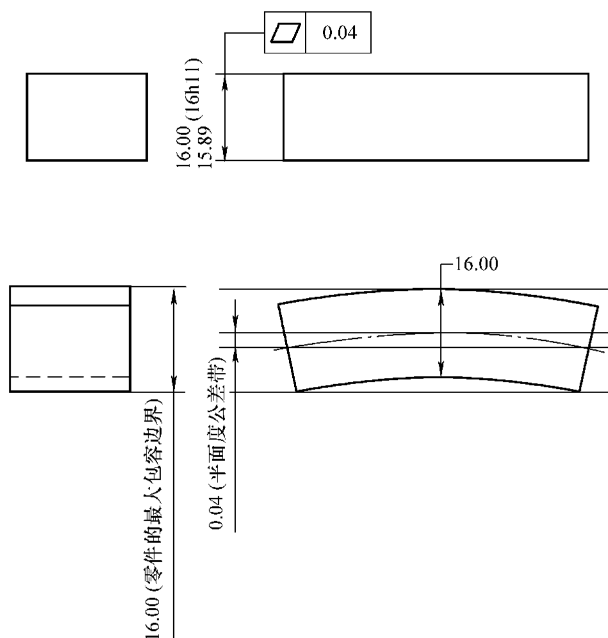


图 4-20　平面度与几何公差第一法则（包容原则）

域变差也不能超出 0.11mm 这个范围。但是当实际加工尺寸趋向于 16.00mm（MMC）时，这个中心面波峰波谷必须更加平坦（表面粗糙度值更小，平面度要求更严），当尺寸为 16.00mm 时，意味着这个中心面的平面度公差为 0，为理想状态的平面，也就是最大实体状



态的理想状态。在此例中，中心面由 RFS 修正的平面度控制等于表面粗糙度控制。当 MMC 修正时，平面度公差能应用尺寸公差的补偿公差，取得一个优化的、变化的表面粗糙度控制。这是平面度较传统表面粗糙度在控制平面情况下的一个优势。

在图 4-21 中，两种平面度的标注方式是为了弥补测量时无法实现理想测量的原因，是一种提高测量可重复性的标注方式。整体平面特征上是 0.3mm 的两个平行面公差带，在平面上的每 25mm×25mm 或者 ϕ25mm 的区域内要求更严格的 0.05mm 的平面度公差带。

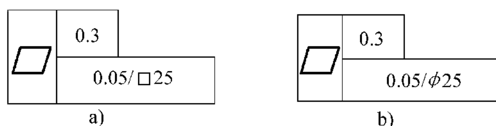


图 4-21　平面度与独立原则

第三节　圆度的定义、应用及检测方法

一、圆度的定义

圆度是二维的形状控制，应用于圆截面的特征，用于评估确定所有组成一个圆面的圆线元素是否在给定的圆度公差范围内。每一个圆度独立确认，无关基准，对被测圆心位置没有要求。圆度公差带是两个在半径方向上的差等于设定公差值的同心圆环。这个测得的极限轮廓的拟合圆心是由最小的径向间距（Minimum Radial Separation，MRS）的中心决定的。最小径向间距是两个在径向方向有差距的同心圆环，能够以最小的间距包含所测的极限轮廓。

评估圆度的方式有三种，通常使用最小平方圆（Least Squares Circle，LSC）法：由理想圆圆周到最大波峰的径向距离（P），加上最大波谷的径向距离（V），即 $P+V$ 为其真圆度。由于计算量巨大，通常使用仪器实现。

其他两种方式如下：

最大内切圆（Maximum Inscribed Circle，MIC）法：最大且内切于极限轮廓的圆的圆心，然后通过波峰以内切圆的圆心作另一个圆，两个圆环的间距就是零件的圆度公差。

最小外切圆（Minimum Circumscribed Circle，MCC）法：最小且外切于极限轮廓的圆的圆心，然后通过波谷以外切圆的圆心作另一个圆，两个圆环的间距就是零件的圆度公差。

圆度定义的公差控制框通常如图 4-22 所示。ASME B89.3.1 中对于圆度的定义非常完整，如图 4-23 所示。这个公差控制框的含义是：该圆柱面的圆度公差在 0.005mm 内，评估方式为最小平方圆（LSC）方式，每转取点次数为 150 次，测量的探针端的半径为 0.03mm。

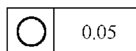


图 4-22　圆度公差控制框

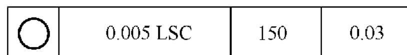


图 4-23　ASME B89.3.1 中的圆度公差控制框

对于在一个面上取多少个圆度值来评估一个三维特征的圆度，ASME Y14.5 没有规定。测量时应确保足够多的测量值，确保这些圆度值足可以代表这个三维特征的轮廓。

圆度是一个很有趣的几何公差控制，在开始接触时，会误认为这个控制很容易掌握理

解，但是仔细研究就会发现，圆度的检测是如此的复杂，以至于 ASME B89. 3. 1 用了独立的一个篇幅来介绍这个公差控制。

圆度是一个不相关原则的公差控制，每一个特征和它相对应的一个理想的圆轮廓做对比。它不需要参考基准。圆度控制一个面，控制所有垂直于特征圆心的断面上的圆线上的元素。

圆度是一个径向的二维控制，每一个面上的元素必须位于两个同心圆环形成的边界内，同心圆的径向间距为特征控制框中的公差值。

当尺寸公差无法足够控制一个圆形特征时（包容原则），可使用圆度来控制圆元素的形状精度。圆度常用来定义短轴类特征，如垫片或短的轴套等。圆度与特征尺寸不相关，不参考基准。例如，为了保证一个圆环在配合轴上滑动，圆环的内径可以使用圆度来定义。

每一组圆度公差带的同心圆环定中心于一个垂直于待测面的圆环线元素的旋转中心线上。因为每次测量的重新设置（归零），允许了弓形面、鼓形面的检测通过。

图 4-24 所示是一个最简单的圆度控制以及这个公差控制阐明的一个径向差为 0. 05mm 的同心圆环公差带。

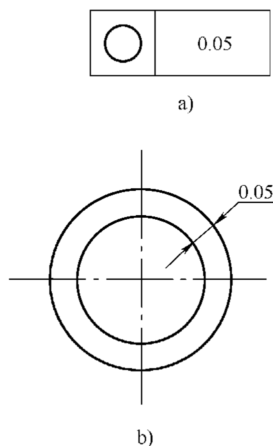


图 4-24　圆度公差控制框与公差带
a）圆度公差控制框　b）圆度约束的公差带

圆度检测时与尺寸公差控制无关，圆形特征面上的每一个断面上圆元素都要位于两个圆环之间。这个公差带圆环中心的确认非常关键，可以按需要采取不同的圆心建立方式。

最大内切圆（孔类特征）或最小外切圆（轴类特征）也可以建立公差带圆心，然后测量。如果特征是外部特征，如轴、圆柱面、锥体或球类，公差带的建立方式是最小外切圆方式或最小的由轮廓线的极点拟合的理想圆。然后内圆同心于外圆。如果特征是内部特征，如孔、锥孔或球形腔，需要先建立内圆，这个内圆最大限度地内切于极限轮廓或这个内切圆由极限轮廓的最高点拟合而成，外圆同理同心于内圆建立。

公差控制框中的圆度公差值相对于尺寸公差控制是加严控制。因此，从逻辑上来说，这个圆度公差值必须小于尺寸公差值。需要注意的是，圆度公差是单方向的半径值，而尺寸公差在这里是直径方向上的值。因为尺寸不相关原则，最大实体材料边界不能破坏掉。因此，圆度公差带和尺寸公差带相互独立（或者说圆度与特征的大小无关，只是控制圆形形状精度），没有产生实效边界（即无配合边界影响）。

最大实体尺寸是限定特征的包容界限，最小实体尺寸是限定每个断面直径方向上的尺寸不能小于这个值。如果尺寸公差都不能满足，那么也没有必要去检验特征的圆度，因为若尺寸公差不合格，则被检测出的零件应当在圆度公差验证前拒收或返工。

圆度控制不能使用最大或最小实体材料条件的原因是，圆度公差控制逻辑上是一种与尺寸无关的控制。因此，不能使用符号Ⓜ，也没有补偿公差的情况。



二、圆度控制的应用

图 4-25 中的圆柱面可以看作是由无限个圆线元素组成的。每一个圆线元素有自己独立的公差带。这个公差带由两个同心圆组成，径向间距为公差控制框中的值 0.1mm，通常这个轴的直径还有一个尺寸公差约束，如 ϕ10.3 ~ ϕ10.9mm，这意味这个轴可以粗或细，有一定的锥度或不是一个直线轴。既然这个零件圆面上的每一个线元素是独立验证的，那么就有这种可能，一个弓形甚至腰形或鼓形的轴可能被验收合格，就像一摞硬币的状态。相互独立的意义在于，它们可以摞在一起，而不同轴，只要这些硬币的圆度在 0.1mm 范围内，而且只要这些硬币的最大实体尺寸在 ϕ10.9mm 之内，最小实体尺寸大于 ϕ10.3mm，那么，这些硬币随意平行分布，都可以组合成一个合格的零件。

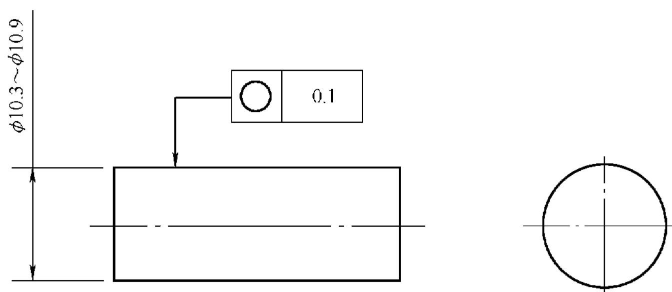


图 4-25 圆度控制

圆度应用要素如下：

1）圆度不可以使用属性检具测量。

2）圆度公差值必须小于尺寸公差值的 1/2。

3）圆度与尺寸公差控制遵循不相关原则。

4）圆度公差不参考基准。

5）每个圆截面的圆度互相独立，即每一次测量需要重新设置。

6）圆度可以应用在截面是圆形的特征上，如锥面。

三、圆度控制的测量

锥度面可以按图 4-26 所示设置测量台架，其中的可调支架是为了优化测量。这个台架可以重新调整以获得最小的测量圆度变差。每次千分尺旋转 360°完成一个断面的测量，然后平移到下一个断面进行测量。千分尺每次开始一个断面的测量时都要归零设置。每一个断面独立测量，并且在其独立的圆度公差带内验证。每个公差带由两个径向差 0.1mm 的同心圆环组成，并且，每一个断面都要首先符合尺寸公差要求（在 MMC 和 LMC 之内）。每一个断面公差带的圆心代表受控面的一个旋转中心点，也是圆度的评估设置点。

组成受控面的所有圆线元素不能超出圆度公差创建的那些圆度公差带，这些线元素由垂直于旋转断面的中心线形成。这个中心线可以看成是一条拟合的中心线，所有面上的圆线元素都必须位于组成这条中心线上的点为圆心的公差带之内。对于一个球体，这个旋转中心为

一个点，但是对于圆柱面特征和锥体特征，这条旋转中心线是一条连续的不自我相交的曲率连续的曲线。

圆度测量时的断面设置方法是在受控圆面上选一点，在所有通过这一点的断面中，选取周长或截面积最小的一个断面在圆面上的截线量取数据。然后按照 LSC、MIC 或 MCC 方法计算这些截面的圆心点。测量时，需要注意的是，零件测量时的旋转中心不是测量的圆度的公差带圆心。

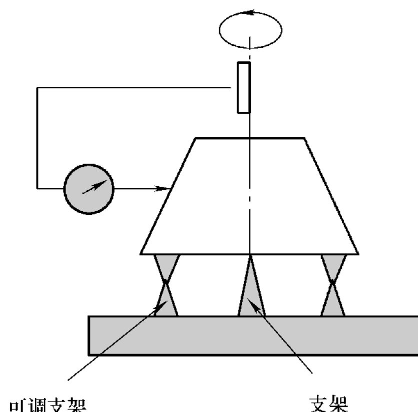


图 4-26　圆度控制检测设置

四、圆度的讨论

应当注意的是，所有的测量程序都是有缺陷的，原因如下：

1）测量设备不可能是理想状态。

2）不能保证检测者的操作流程准确或完全符合要求。

3）检测时的工装夹具会对基准的建立造成偏差，更差的情况是，有时候根本没有工装夹具可以利用。当然由于圆度控制没有基准要求，这里不是一个导致圆度缺陷的问题。

4）由计算机辅助的检测设备的算法和程序编码都是有缺陷的。

5）检测设备的探针不能取平面上所有的点，或者这些点的选取没有代表性。

检测者的培训并不完善，造成检测任务在有缺陷的方式下进行。通常这些检测者知道设备的功能，而不知这个标注在零件特征上的几何公差控制的实际意义，不知道如何来验证检测的结果是否符合要求。最糟糕的情况是，检测者常常自以为自己非常正确，造成了没有继续研究、学习、探索和能力评估的局面。这种能力不足和检测验证程序上的错误是很常见的。当你提出纠正意见时，自大的态度又会让这些检测者恼怒，认为你在影响他们的工作，从没有意识到他们在收集数据时实际是在做无用功。这就是我们的现状。

V 形架的应用就是一个很好的实例。V 形架的一个缺陷是不能稳定测量一个零件的轴线，轴线的位置在测量的过程中是跳动的（建立了一个不稳定的基准轴线）。这个缺陷对实际特征的圆度或后面将要介绍的圆柱度会造成误判，因为从这些公差控制定义来讲，要评估这个面的几何特征是基于一个稳定的轴线，然后得知这个受控特征的圆度或全跳动、同心度、位置度、锥度。这种测量方式将基准特征面在旋转时产生的变差累积到测量结果中，最终导致基准轴的偏移和指示器移动全量（FIM）的不准确，由此得到结果可疑的数据。一个椭圆形的物体会被误认为球形，或者一个在公差范围内的圆跳动会被误判为不合格零件。因此 V 形架的检测不能确定一个零件的好坏，只能是一种粗略的估计。

如果两个具有不同倾斜度的 V 形架用来测量一个相同零件，就很容易发现这种缺陷。

圆度的测量设置非常困难，因为经常和跳动检测混淆。同样地，直径方向上的相对点测量也不能可靠地检测圆度或直线度是否满足最大实体材料的尺寸。如一个三棱柱状的物体，显然直径上相对点的测量是不能满足检测要求的，这样得到的结果可能是一个圆。这也是一个推荐为粗略检测的方式。因为不参考基准的特性，圆度更多应用于初始基准设置，作为其他基准或特征的参考基准，如轴承的内圆定义。



五、圆度检测设备

ASME B89. 3. 1 关于圆度检测的描述中都是探针和零件表面的接触方式。应用运算或数据分析技术进行勾画检测结果的记录图，一般是极差图。当探针在零件表面旋转或零件绕一个精确定义的轴旋转时读取数据。为了方便读取，记录图放大了探针的径向波动。

当然也不排斥其他检测方式，比如可以同时测两点的圆度测量方式。这时使用有读数的千分尺和 V 形架的组合测量台。但这种测量方式只适用于被测特征具有一致的不规则分布。如果零件有奇数个凸缘（见图 4-27），且分布不均匀，实际测得的直径方向上的偏差值会小于真实的圆度值；如果凸缘是偶数个且为均匀分布的，实际测得的圆度偏差将大于实际值。

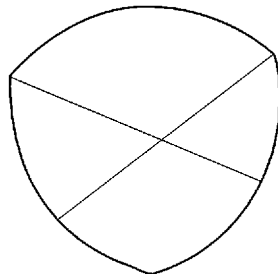


图 4-27　有奇数个高点的圆柱面的微观图示

V 形架的测量方式看起来比直径方向的两点测量更有用，但是，对于已知的规则分布凸缘的圆柱面，不同的测量倾斜度对测量结果会有很大的影响。没有 V 形架能够适应所有的凸缘状圆柱面。这样看来，V 形架法和直径方向对点测量法一样有缺陷。当零件在 V 形架上旋转时，轴线会基于零件的极点而起伏，无法固定在一个位置，不能将零件稳定在一条轴线或一个中心上进行评估，在空间上没有一个测量的基准点。

圆度定义的是一个旋转面、圆柱面或锥面，所有的垂直于旋转中心线的平面和特征面上的相交点等距于它的中间点，且位于一个同心圆环的公差带内。

如图 4-28 所示，每一个断面的圆元素都必须位于一个同心圆环之间，同心圆环间距为规定圆度公差值。也就是说，被圆度控制的所有表面上的点都必须位于表面的实际尺寸范围内（最大实体尺寸）和圆度要求的范围内（更像是圆形形状精度的要求，不影响特征尺寸）。

六、零件的自由状态

自由状态通常用来描述一个非刚性零件的可能状态。零件通常是在一个加工或检测工装上测量的，但是当去除这些工装的约束时（比如夹紧装置），零件的尺寸会变化很大，如汽车里的冲压件（如车身顶盖）和塑料件（如防溅板）。ASME Y14. 5 标准中规定当零件隐含或使用自由状态时，用符号Ⓕ表示。也可以在图样中给出一个技术要求去说明零件在自由状态检测，或在一定的模拟装配情况下有约束地进行测量。

因为圆度是不参考基准的，所以一定是在无约束状态下测量的，对于非刚性件，通常应用平均尺寸。平均直径就是一个常见的工程例子。平均直径（AVG Diameter）如同圆度控制是一种形状控制方法，是圆或圆柱面特征在自由状态下的测量，通常在尺寸后附加 AVG。AVG 方法规定了一个非刚性零件的平均直径的圆度，以保证零件形状能够满足一定的装配约束。平均直径的计算方式是一个圆或圆柱面的截面的几个直径值的平均值。选取的直径数量（至少是 4 个）和位置要能代表这个圆或圆柱面特征。需要注意的是，自由状态的圆度公差值大于尺寸公差值，平均直径值要在最大实体直径和最小实体直径范围内。

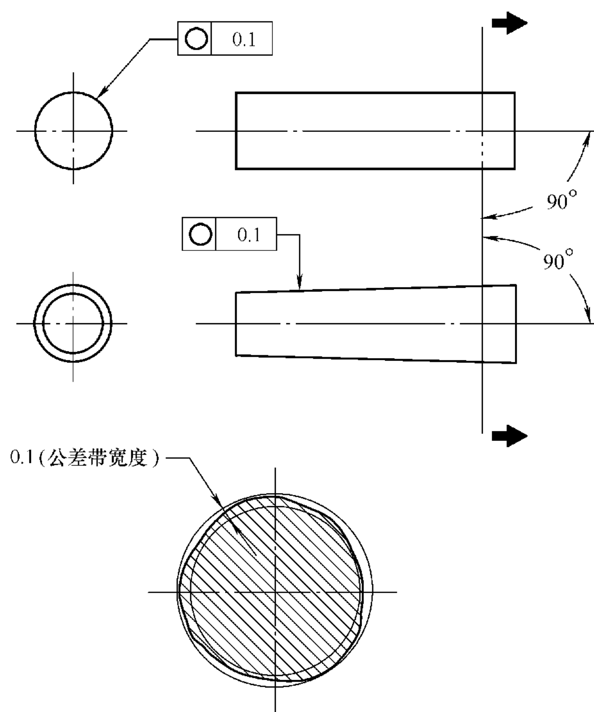


图 4-28　圆度控制及公差带

如果 AVG 被添加到一个尺寸后面，这说明被验证特征要求有一个给定限度内的平均值。比如，对于锥形工件的测量，特征的外圆会有一个平均直径。如果要检测一个圆柱面的相对点，那么每个断面需要取最少 4 个点，同样可以定义一个平均值。AVG 定义的方式取决于设计者的考虑，零件的平均值是否处于一定的尺寸范围内，以满足零件在装配中的功能。

通常零件要在一定的约束下检验，其目的是为了模拟功能或总成装配环境。这可以确保零件是在图样规定的约束条件下检测的，零件能够工作。如果有这个要求，零件图上的技术条件就要说明。

当薄壁零件被夹持在工装夹具上时，零件的测量会有约束，与自由状态时的测量不同。这种尺寸在约束条件和自由状态的变差叫作自由状态变差。由于这一点，设计者需要谨慎定义几何公差的控制，以便能够充分实现加工和制造，并使成本最低。

图 4-29 所示是一个比较常见的注解，在公差控制框下有见注解 1 的标示。这个注解解释了零件在检测过程中的约束原则。这个可以解释如何将零件装配在基准上，甚至是销钉锁紧的形式和应用多大的压力。

图 4-30 所示是自由状态检测的例子。

图 4-30 中，圆度公差用来确定零件的最大实体尺寸和最小实体尺寸在自由状态下测得。同时因为有符号 AVG，故需要验证零件的平均值分布。

其中，最大实体尺寸和最小实体尺寸是一个平均值域，用来确认检测的平均尺寸的检测范围。例如实际测得两个自由状态直径值是 15. 30mm 和 16. 20mm（同一断面，旋转 90°方向测量），平均值是(15. 30 + 16. 20)mm/2 = 15. 75mm，那么 15. 75mm 就是这个断面的平均



直径（为了简化描述，这个截面实际应该至少取 4 个值），这个平均直径又必须在两个极限尺寸 15.4mm（LMC）和 16mm（MMC）之间。所以这个检测值合格。应注意，这个自由状态的圆度公差是大于尺寸公差的。

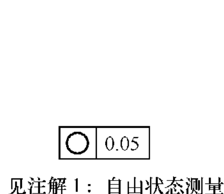


图 4-29　圆度的自由测量定义方式

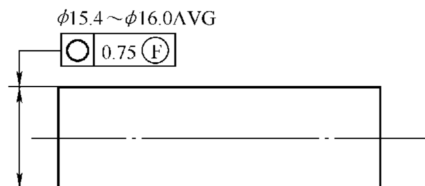


图 4-30　圆度的自由状态定义与 AVG 修正

第四节　圆柱度的定义、应用及检测方法

一、圆柱度的定义

圆柱度是一种三维的形状控制。这个几何公差控制同时约束了特征的圆度、直线度和锥度。几何公差控制框中的公差值是一个径向的值，这个公差带是一个径向有间距的两个同轴圆柱面环。所有测得的特征面都必须位于这个同轴圆柱面环内。圆柱度和尺寸公差是不相关原则，它们独立验证，待测特征先于圆柱度进行尺寸公差验证，不能超过最大实体尺寸和最小实体尺寸，然后进行圆柱度验证。

圆柱度的公差控制框通常由圆柱度符号和圆柱度公差值组成，没有基准、直径符号或修正符号Ⓜ。

一个理想的圆柱度特征是所有特征面上的点等距于一个共同的特征轴。所以通常的检测流程是先固定一条旋转轴线，旋转特征面，并且使用探针探测特征面。然后评估这个特征面的凹凸点、桶形、腰形或锥度。因为实际上轴线很难稳定在一条线上，所以难以去除检测的不确定因素。

因为这种旋转检测的原因，很多人将圆柱度错误地理解为后面将要介绍的全跳动检测。全跳动是检测特征围绕一个特征轴转动进行测量。圆柱度只是一个形状控制，只需要验证特征面是否位于一个同轴圆柱面环内，这个圆柱面环径向间距为公差控制框中的值。圆柱度在检测中不需要一条固定的轴线，通常需要计算机进行大量的数据运算，分析检测得到的点的位置是否位于一个公差带内。

圆柱度和全跳动的区别在于，圆柱度是先测量然后由数据拟合一条轴线；而全跳动是先设置一条轴线（作为基准轴），然后进行圆柱面上点云测量。

圆柱度的形状控制方式和圆度非常相似。它们都是独立控制方式，不需要基准，不需要实体材料符号（如Ⓜ）修正。因此，当特征尺寸从 MMC 变化到 LMC 时，形状控制公差不能得到尺寸公差的补偿。对于这两个形状控制，以及这一类的几何公差控制，如平面度和直线度一样，它们本身在公差控制框中的公差值应该小于尺寸公差值的 1/2。相对于尺寸公差，它们是对零件更加精确的约束。圆度和圆柱度都是径向公差，应用尺寸不相关原则（RFS）。

圆柱度是最复杂的形状控制，最难检测。圆柱度控制经常用于高速旋转的轴承上。圆柱度同圆度一样难以设置，所以不推荐使用，并要注意不要和全跳动混淆，圆柱度更像一个没有参考轴线的全跳动控制。

二、圆柱度的应用及测量

图4-31所示是一个圆柱度控制的例子。圆柱度是一个三维面形状控制方式，包含了圆度、直线度和锥度的联合约束。

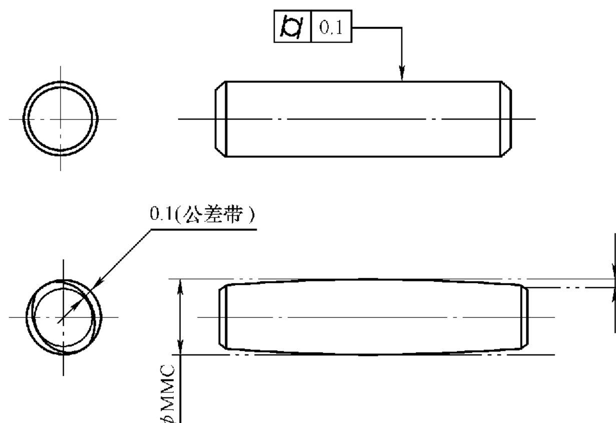


图4-31　圆柱度控制

圆柱度的公差控制框由圆柱度符号和一个径向的公差值组成。对于刚性零件，圆柱度控制是对尺寸公差控制的一个补充控制，目的是更精确地约束特征面。圆柱度和尺寸公差不同的是，这里的尺寸公差是一个直径值，约束了特征面的最大、最小包容面。圆柱度约束了特征面上的点在一个径向间距为公差控制框中值的圆柱面环公差带之内。

这个例子说明了所有圆柱面上的点必须位于同轴的两个圆柱面之间，这里圆柱面的径向间距是0.1mm。圆柱度的测量与尺寸不相关，各自需要独立认证。面上的凸凹点间距不应该超过0.1mm，锥度也不能超过0.1mm。

这个零件可以通过很多方式来进行检测。一种常用的检测方式如图4-32所示。固定支架和可调支架用来定向零件，目的是能够将支架设定的轴线同轴于旋转轴。旋转轴上连接的是带读数器的千分尺。检测时，旋转零件，同时上下移动千分尺，千分尺的探针与待测面接触。指示器移动全量（FIM）和公差控制框中规定的圆柱度的值做比较，合格的零件必须位于这个公差值范围内。如果没有特殊要求，零件的特征尺寸也不能超出最大实体尺寸（MMC）。

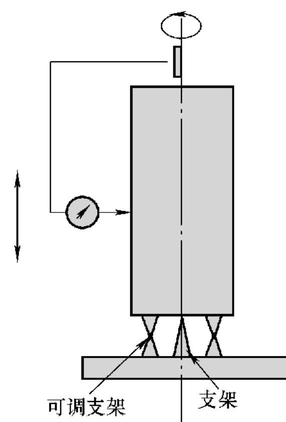


图4-32　圆柱度的测量设置

当对这个控制进行验证的时候，通常先验证特征的MMC和LMC（LMC是每个断面直径方向上的检测值，卡尺或千分尺足够用来检验）。

圆柱度和圆度的区别是，圆柱度控制三维特征面，且圆柱度是一个集圆度、直线度和锥度功能于一身的控制方式；圆度控制二维特征面，能够用来控制由二维的圆元素组成的面，如圆柱面、球面和锥面。

所有受控圆柱面特征的面元素都必须位于两个理想的同轴圆柱面形成的环形公差带内。对于一个外部特征，如轴的公差带的外圆柱面为最小能够包含所有圆柱面特征的圆柱面，是一个最小的外切圆柱面；内圆柱面为径向间距等于圆柱度公差值的圆柱面，并同轴于外圆柱面。

对于内部特征，如孔的公差带的内圆柱面为最大的与内部特征相切的圆柱面，外圆柱面同轴于最大内切圆柱面，径向间距为公差控制框中公差值的圆柱面。当然还可以使用最小平方圆方式求圆心，然后构建一个公差带。

使用 V 形架来检验圆柱度的方式是一种粗略估计的方式，不能精确地判断零件是否超差。

对于圆度检测，探针接触零件，在不同的截面上旋转 360°。对于圆柱度检测，零件做 360°旋转，探针沿着纬线方向平移。在检测过程中，记录下数据。然后将这些数据覆盖在代表圆度或圆柱度公差带的同心圆环下，检测测得的特征轮廓是否处于公差带内。其中圆度是针对独立的截面，圆柱度是针对整个的特征面。圆柱度的公差控制框的引线直接指向受控特征。

极差图是一个被广泛采用，且能保证测量圆柱度精确度的工具。

圆柱度应用要素如下：

1）圆柱度不需要参考基准。

2）圆柱度综合控制了一个圆柱面的圆度、直线度和锥度。

3）圆柱度与尺寸公差应用不相关原则。

4）圆柱度必须小于尺寸公差的 1/2。

第五章　几何公差控制——轮廓度控制

轮廓度的控制可以有相关基准或独立应用。轮廓度控制方式有两种：控制线元素的为线轮廓控制，控制面元素的为面轮廓控制。

轮廓度控制的优点如下：

1）既可以做二维控制，也可以做三维控制。

2）公差带可以是等边公差，也可以是不等边公差。

3）可以应用基准来定向和定位，也可以不引用基准。

轮廓度公差控制经常用在不规则的形状特征上，例如轮廓。设计者可以决定是否使用参考基准。通常，如果轮廓度公差没有参考基准，这种情况下，轮廓度仅仅控制形状，属于形状控制一类；如果参考了基准，轮廓度综合控制了一个轮廓特征的形状，以及轮廓特征公差带的尺寸或（和）位置。轮廓度常应用于匹配零件的匹配特征。

如果没有特殊规定，轮廓度公差带是基于基本轮廓的尺寸（由公称尺寸定义），并且等边分布于基本轮廓的。

第一节　线轮廓度的定义、应用及检测方法

一、线轮廓度的定义及阐述

线轮廓度是指在特征受控长度上由等距轮廓线建立的二维公差带。线轮廓度控制实际上是一种二维线元素的控制。这个控制通常通过控制组成面的线元素在一个特定的尺寸范围内浮动，进而达到控制面的形状的一种几何公差控制方式。这样，面的形状被控制在无限个线元素的公差带之内，每一个线元素公差带是基本轮廓的两条在规定公差值的等距线。每个公差带独立验证，公差带大小等于轮廓度特征控制框中的值。

定义需要轮廓度控制形状的面，必须首先定义公称尺寸（如坐标、倾斜度或半径）或数学公式，然后公差带建立于基本轮廓（或设计轮廓）。常用检验设备包括视觉检测（光学对比）、样板对比、读数指示器和对比表。CMM 也能够实现轮廓度检测，如果配备上光学对比设备，就同时具有了数量和属性检验的功能。

二、线轮廓度的标注方式及公差分布

轮廓度是一种多功能控制方式，可以做二维控制（线轮廓度）或三维控制（面轮廓度），可以引用基准，也可以无基准参考。轮廓度通常需要一个基准或多个基准定向或定位公差带，但是基准不是必须的。线轮廓度通常不参考基准，但必要时，也可以相关于一个基准来定义。线轮廓度仅仅控制一个特征的线元素（二维的，用于截面处的检查），但面轮廓度控制的是一个特征的整个表面轮廓（三维）。也可以使用“应用到周围”的类似焊接符号标注来表示控制整个轮廓（见图 5-1），轮廓度公差控制延伸到一个零件的其他视图上；或标注到一个异型面上，这些不连续的面会使用“全部应用”拼接到一起来简单说明公差带



的应用范围。

理想轮廓必须使用公称尺寸定义，或有默认的公称尺寸关系。轮廓度的公差带可以对称分布在基本轮廓的两侧或者不对称分布。当使用等边分布公差带时，公差控制框中的公差值等边分布于基本轮廓，一半公差分布在基本轮廓内侧，另一半分布在基本轮廓外侧。如果是等边轮廓度的控制，一个引线直接从公差控制框指向基本轮廓，不需要用细双点画线提示公差分布位置。如果使用不等边公差，细双点画线需要标示在基本轮廓的两边，引线指向公差带的细双点画线（见图5-2）。

图5-1　应用到全部轮廓的标注方法

在图5-2中，轮廓度控制中的公差代表整个轮廓度公差带宽度。一个附加的定义规定了不等数量的公差带在基本轮廓公差带两侧的分布。这个额外的定义由一个轮廓度基本公差值和一个引线组成，引线的箭头指向细双点画线包围的公差带。0.1mm的轮廓度公差值显示在辅助的轮廓度定义中，0.5mm轮廓度公差值分布在基本轮廓的外侧。

图5-3所示是在公差控制框使用修正符号Ⓤ的等价定义方式，Ⓤ表示0.5mm在材料的外部。为了明确传达设计意图，建议使用图5-2所示的方式标注。

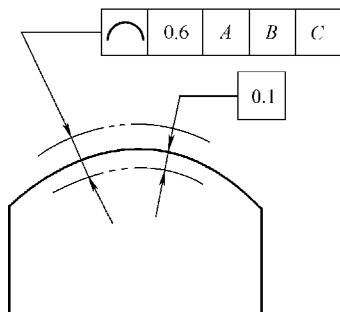


图5-2　不等边分布的轮廓度定义方式

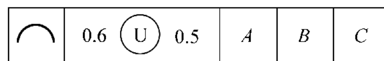


图5-3　不等边分布的轮廓度等价定义方式

图5-4显示了如何指定轮廓度公差分布的方向和轮廓度控制的延伸。图5-4a是一个等边公差定义，用引线连接公差控制框和基本轮廓。轮廓度公差带对称分布在基本轮廓两侧。轮廓度公差控制框的“*B*↔*C*”表示此轮廓度控制应用于从*B*点到*C*点的轮廓面。

为了满足线轮廓度公差的约束，整个受控轮廓线必须在公差带范围内。图5-4b中公差带外边界是基本轮廓，内边界是0.4mm基本轮廓向内偏距的线。受控面不能超出基本轮廓（三维数据定义的面数据），可以向内边界偏离0.4mm。这个内边界用一条细双点画线来表示。轮廓度公差控制框直接指向受控特征面。细双点画线可以稍短，只是用于表示公差带的分布方向。字母*B*和*C*用来表示此轮廓度公差控制的起点和终点。在公差控制框的下侧，需要给出符号“*B*↔*C*”。

注意这些例子中，轮廓的每一段都有不同的公差控制值。每一个轮廓度公差的引线上使用不同的字母来指定，这些字母起到划分不同公差带区域的作用。

轮廓度公差带是两个一致的边界，所有的受控面或线元素必须位于其内。定义基本轮廓的尺寸方式有基本半径、基本坐标尺寸或基本倾斜度尺寸。有时也用公式的方式。现代的零件曲面设计中，加工和检测的设备一般都具有数据交换功能，可以应用数学模型定义，如注

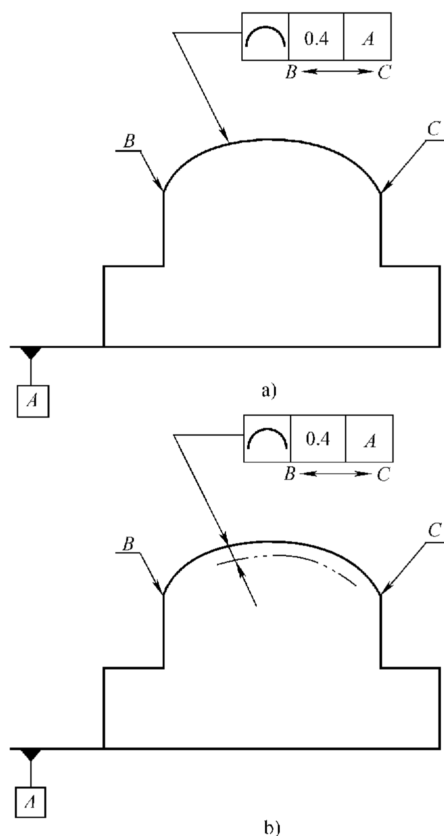


图 5-4　轮廓度的定义实例

解基本数据的 3D 数学模型。

如果使用尺寸公差定义一个零件的尺寸特征，尺寸特征又相关于一个基本轮廓，那么该零件必须在这些尺寸公差范围内。如果零件没有尺寸公差，只使用公称尺寸定义基本轮廓，那么公差控制框中的公差同时约束轮廓度和尺寸。所以，形状控制和轮廓度控制首先由零件的基本轮廓定义，然后再用公差控制框定义公差。

线轮廓度控制和面轮廓度控制可能同时出现在一个特征面上。在这种情况下，线轮廓度公差值必须小于面轮廓度公差值，这样才有意义。轮廓度必须在视图中清晰地表明控制的基本面特征。在轮廓度的检具上，型板应尽可能地垂直于基本轮廓。检测的设备包括光学比较仪、带读数仪表的样板和 CMM 设备。

如果轮廓度控制包含一个零件的锐角特征，公差带必须延伸到零件边界线的相交点。

三、线轮廓度的应用

图 5-5 所示是一个线轮廓度几何公差定义的例子。对于一个几何公差线轮廓度控制，每一个平行于投影面且定向于适当的基准面的横截面上的受控面上的线元素必须位于两条基准线的等距线之内。这个公差带是由一个给定几何公差（轮廓度）为直径的圆且定圆心于基本轮廓线上，并在基本轮廓线上划过所形成的两条包围线。这不同于面轮廓度。面轮廓度的



公差带形成于一个给定轮廓度公差为直径的球且定球心于受控面基本轮廓面上做全方位滑动所包围的公差面。

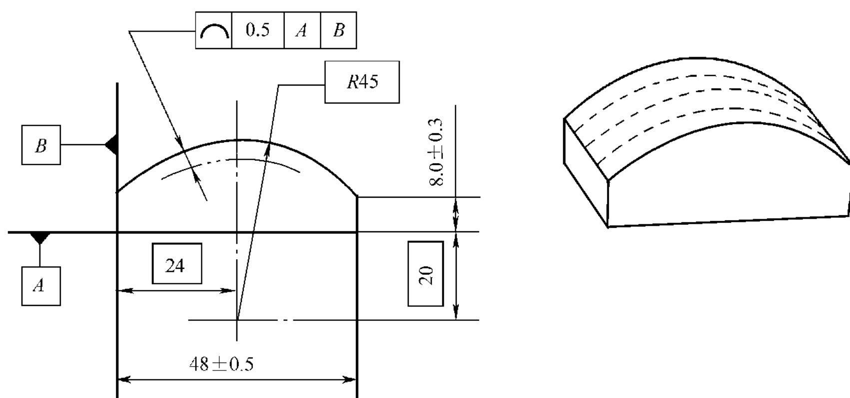


图 5-5　一个零件的线轮廓度几何公差定义

这个线轮廓度的引用基准不是用来定位特征面的线元素，而是用来定向线元素。这个受控面由无数个线元素组成，每一个线元素的起点被约束在 7. 7 ~ 8. 3mm 之间，并且必须在 0. 5mm 宽度的轮廓度公差带之内。这个公差带由偏距于基本轮廓向内 0. 5mm 的曲线和基本轮廓线组成。这个例子的受控面是一个连续曲率的曲面，如果需要包含曲率不连续的面，则需要特别标注。各个横截面独立设置，相互独立检测。

因为每个公差带可以有不同的起点设置（范围是 7. 7 ~ 8. 3mm），也就允许这个受控面可以有一定的锥度。这个线轮廓度定义引用的基准约束了所有线元素相对于基准的定向，相当于线元素之间的定向关系约束。

当定向基准到轮廓的尺寸公差带从最大实体尺寸（MMC）8. 3mm 变化到最小实体尺寸（LMC）7. 7mm 时，公差带会被压缩，可用的公差变得越来越小，直到可用公差带变为零。换句话说，零件的高度尺寸公差带不能被超出。那么每个线元素的轮廓度公差带在起始点上可用公差可能因为尺寸公差的变化而有不同的可用公差带（小于或等于 0. 5mm）。这在检测中应当注意。这个公差带用来控制线元素的定向和形状。

四、线轮廓度的测量

图 5-5 中，受控特征还需要被公称尺寸定义位置，公差带形状符合基本轮廓。每一个面上的线元素有一个独立的公差带，每个公差带由两条向内和向外偏距于基本轮廓 0. 25mm 的线围成。每一个面上的线元素都要在这个公差带范围内。可以使用轮廓样板检具检验，检测设置如图 5-6 所示，其原理是比较待测特征与检具面的差异。

轮廓度的测量方式和设备有限。这是由轮廓度控制的特征的非规则性决定的。常规的检测设备无法完成检测。通常的轮廓度检测设备有光学比较仪、三坐标仪、检具型板。

检测设备和方式取决于零件和基准结构的配置和尺寸。应注意的是，是否参考基准是可选的，由设计需要决定。轮廓度是唯一的特例，其他公差控制要么一直参考基准，要么永不参考基准。

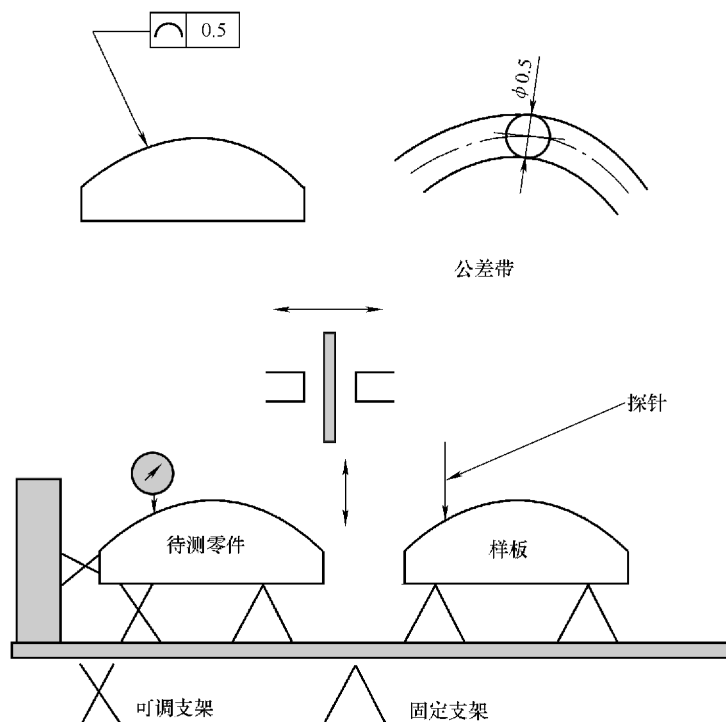


图 5-6　轮廓度的检测设置

线轮廓度的应用要素如下：

1）线轮廓度公差在几何公差控制中可以参考基准或独立应用。

2）线轮廓度公差应用于非规则面形状控制和平面控制。

3）线轮廓度公差要求受控的非规则面特征必须被公称尺寸定位。

4）如果没有特殊规定，公差带取自于受控面的轮廓，且等边分布于基本轮廓。

5）非等边轮廓度公差控制使用一条双点画线来标明公差带对于基本轮廓的方向和数量。

6）一个线轮廓度公差带由两条等边分布于基本轮廓两侧的线组成，两线相距规定的公差值。当然如果有特殊规定，图上会有双点画线另外标明公差带的分布。

7）如果线轮廓度没有参考基准，则轮廓度是一个形状控制类公差。

8）当轮廓度公差参考了基准，则轮廓度控制了面特征的形状、尺寸和（或）位置。

9）弧度、曲率、曲线、面或任何线都可以用来组成一条轮廓线。

10）测量轮廓度，特别是面的轮廓度，探针必须垂直于被测面的切线。

11）公差控制框中可以使用最大实体原则或不相关原则，但是不能应用于轮廓度公差。

12）一个面的轮廓度可以应用到非连续面，用于这些面的共线控制。



第二节　面轮廓度的定义、应用及检测方法

一、面轮廓度的定义

面轮廓度是在特征受控长度或范围上由等距理论轮廓面建立的三维公差带。面轮廓度和线轮廓度的应用相同，也有扩展，如同面度控制和两个以上面的连续控制；锥度控制，确保锥形特征元素点都在公差范围内。

使用面轮廓度控制同面度的情况经常出现在一组基准支点或一个加工零件的复合基准面，其目的是定义精度范围内的基准。

面轮廓度的应用要素如下：

1）面轮廓度可以参考或不参考基准。

2）面轮廓度应用于不规则面或平面的定义。

3）面轮廓度控制的面需要先被公称尺寸定义出基本轮廓。

4）面轮廓度公差带形状同基本轮廓，如果没有其他规定，公差带等边分布于基本轮廓两侧。

5）当应用非等边公差时，需要使用双点画线来说明公差带的方向，以及偏离基本轮廓的值。

6）面轮廓度控制的公差带是两个三维空间面，沿着受控特征延伸，如果没有使用双点画线来特殊说明，则这个公差带等边分布于基本轮廓两侧。

7）如果没有参考基准，轮廓度降级为形状公差控制，需要尺寸公差来定位受控特征。

8）如果参考基准，轮廓度公差控制了受控特征的形状、尺寸和（或）位置。

9）弧度、曲率、曲线、面或线可以被用来描述基本轮廓。

10）在测量轮廓度时，特别是面的轮廓，探针应垂直于被测面的切面。

11）面轮廓度是唯一的控制不连续面的同面度的几何公差。

12）面轮廓度也用来控制锥面度。

13）一般情况下，面轮廓度不应用最大实体条件和不相关原则。

二、面轮廓度的控制与基准参考

面轮廓度可以看作是线轮廓度的一种扩展，即从二维到三维的控制，由两条线围成的公差带扩展为由两个面围成的公差带。面轮廓度控制的面特征，其所有的受控面的元素相互关联，而线轮廓度控制的面只是限定一次测量，即一条线上的元素相互关联。也就是说，线轮廓度检验合格的零件在面轮廓度下可能不合格。

这里讨论的是不参考基准的情况，面轮廓度这时只控制相对于基本轮廓点元素之间的偏移，基本轮廓的公差带由尺寸公差定义，相对于面轮廓度控制，这是一个固定相对宽松的公差带，面轮廓度定义的公差带的两个面可以在这个尺寸公差带定义的面内旋转浮动来满足要求。

对于不连续面的同面控制的设计应用，面轮廓度控制了两个以上的面的共面性。如图5-7所示，图5-7a所示是在同一水平面的不连续面，图5-7b所示是阶梯不连续平面。面轮廓度在公差控制框中没有基准。在图5-7a所示的公差带解析中，可以看到，三个面其实是

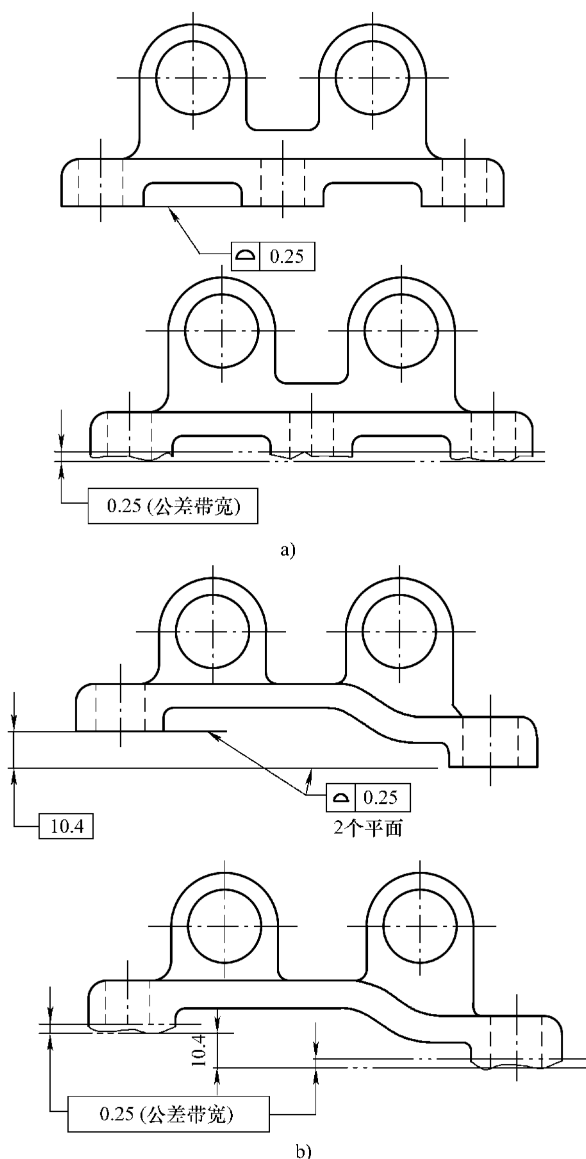


图 5-7　不连续面的轮廓度控制

处于同一个平行面公差带中，也就是三个公差带是互为基准的，同理，阶梯面也是相同的。这种面轮廓的定义和直线度或平面度很容易混淆。应注意的是，平面度和直线度是定义了这些零件上的面特征是平行的或平的，但不是相互属于另一个面的公差带。同面度要求每一个受控面与另一个（或一些）受控面是同一个平面，或是由其他面定义的一对平行面公差带，也就是这些不连续的面互为基准。直线度和平面度只应用于独立的线或面。这也是直线度和平面度不能应用在不连续的平面上的原因，因为在逻辑上，直线度和平面度是不能参考基准的。

当同面控制应用基准时，同面度的公差带是两个平行面，如果没有其他要求，这个公差



带等边分布于受控面的公称尺寸两侧。这种情况下，受控面必须和参考基准（即需要共面的面特征）在规定的面轮廓度公差带范围内。检测时，零件需要接触基准特征，在基准面上进行归零设置。在基准面的基本轮廓上等边分布相应的公差带，即两个平行平面，待测面元素必须位于这两个平面之内。

当同面控制不参考基准时，同面控制的公差带是两个理想的平行面，相距规定的公差值。不参考基准的同面度检测方式和有基准的不同，此时需要判断这两个面的相互关系，它们是否处于规定的理想平行面内。注意这个面是允许倾斜的，当然在尺寸公差限定范围内，所以只限定一个面的检测是不合逻辑的，这样做等于多限定了一个平行度的控制。

三、面轮廓度的测量

图 5-8 所示是一个锥体的面轮廓的三维控制。正如圆柱度控制中产生了由两个有径向间距的同轴圆柱面组成的公差带一样，锥体的面轮廓度控制也创建了一个由两个同轴锥面形成的公差带，组成公差带圆柱面的径向间距和基本倾斜度分别由公差控制框定义和图样中锥体的倾斜度定义。

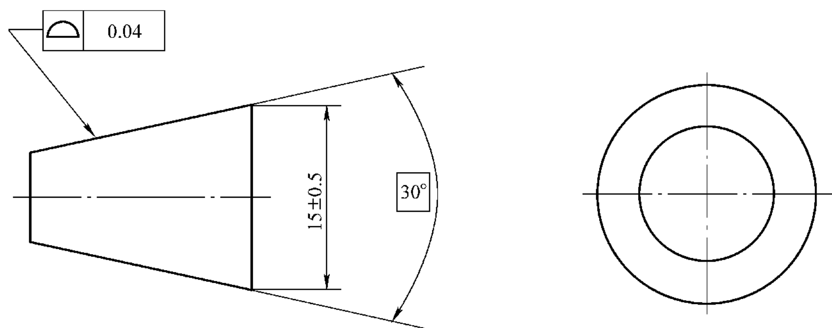


图 5-8　面轮廓度控制一个锥面

按照图 5-8 中的定义，锥面的大端直径必须在 ϕ14.5 ~ 15.5mm 范围内，并且必须位于同轴的两个 0.04mm 距离边界内。公差带的基本锥度角是 30°。如果整个特征面位于公差带之内，那么该锥面被认为符合锥度要求。

可以进行这个公差控制的一个粗略检验设置，放置锥体到一个 V 形架中，然后把 V 形架置于三角板上。通过量块建立规定的基本锥角。这个设置包括三角板、量块和放在测量台面上的带读数的高度千分尺。一旦设置完成，这个锥体的最高纬线成为水平，锥体可以在 V 形架上旋转，而千分尺则可以沿旋转锥体上最高的纬线往复移动，通过读数指示器移动全量（FIM）的读数可以评估待测目标的锥度。因为锥体在 V 形架上旋转时，得不到一个稳定的锥体的轴线，所以采用 V 形架进行测量时必须仔细。锥面的缺陷会导致锥体轴线的晃动，产生错误的 FIM 读数，导致锥度读数错误。或者，轴线移动而导致锥度变量的不确定性，不能反映真实的锥面偏差。所以在这种测量中，一定要设法稳定轴线然后测量。因为 V 形架的轴线不稳定缺陷，所以这种方式只能是一种粗略的估量，不能作为最终验证结果，通常用于工艺过程中。

图 5-9 所示是针对图 5-8 的测量设置。V 形架放置在 30°的量块上，零件在 V 形架上做

360°旋转。读数千分尺指针和锥体特征面垂直接触，并沿维度方向滑动。

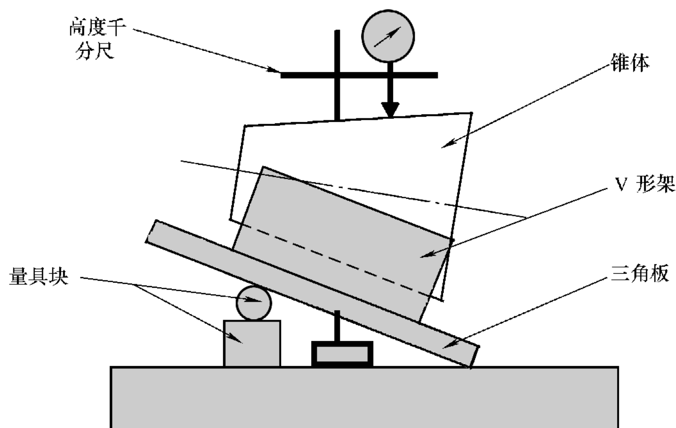


图 5-9　面轮廓度控制一个锥面的检测

在图 5-10 中，受控特征表面必须位于两个同轴的径向间距为 0.02mm 的公差带内，公差带的锥角为 55°，共轴于基准轴线 *A*。任何轮廓度几何公差控制中，基准都是用来定向或定位的，但基准并不是必需的。

在图 5-10 中，锥形的轮廓度可以通过增加一个或多个基准约束。基准特征创建了公差带的基准轴线 *A*。这个设置对锥度控制增加了一个同轴度约束。在不同的零件设置中，基准能够被用来定向定位锥度公差带。

公称尺寸 10mm 是要求检测者对于此位置的尺寸 ϕ8.1～8.2mm 进行测量。轮廓度公差需要独立验证。对这个轮廓度控制的检测可以用光学比较仪。可以先对这个零件进行粗略的检查，将基准特征放置于 V 形架上进行测量，使用量块建立倾斜度（为锥度角的一半），使锥面处于水平位置。

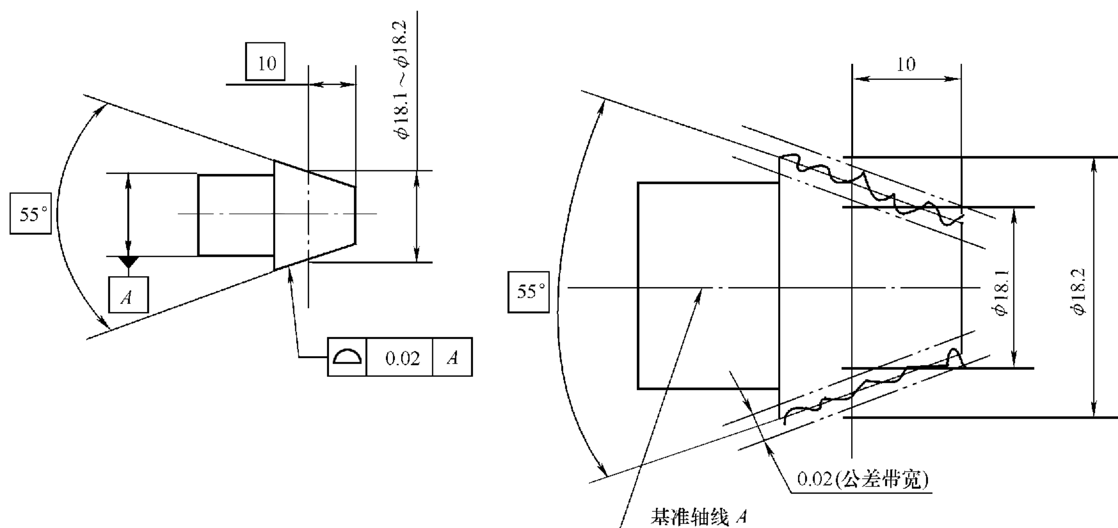


图 5-10　一个零件的面轮廓度定义及公差带解释



图 5-11 所示是一个面轮廓度的控制，这个面特征还需要公称尺寸的定义来完整约束。轮廓度公差带需要满足这些公称尺寸的定义。整个面在一个整体的公差带范围内。这个公差带分布在基本受控面的内部和外部 0.35mm 的两个偏距面之内（等边分布），相当于一个直径为 ϕ0.5mm 的公差球，球心位于基本轮廓上，即每侧半径为 0.25mm，全量滑动时所形成的公差带。受控的特征面必须位于轮廓度公差带之内。进行完整的基准尺寸定义，就可以确切地定义特征面的大小、形状、定向和位置。

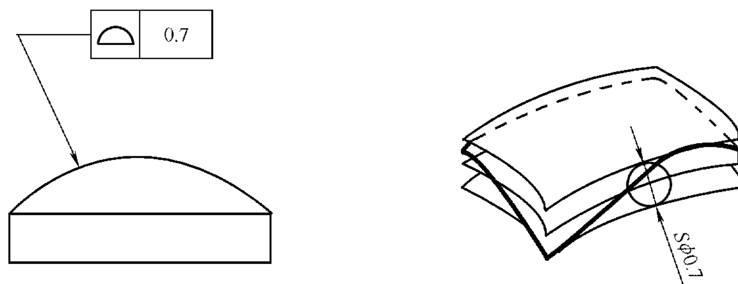


图 5-11　面轮廓度的定义及相应公差带

需要注意的是，轮廓度控制不能使用 MMC 或 LMC 修正，但是尺寸公差约束的基准特征可以使用 MMC 或 LMC 修正。这个 MMC 修正基准的轮廓度公差带是不变的，但是当基准尺寸在允许的范围内变化时，公差带可以获得一个浮动量。比如基准孔，如果加工的尺寸大于 MMC，而检具销尺寸为实效尺寸（小于 MMC），相当于零件在检具上有一定的活动量。这也是一种公差放宽、降低成本的方式。

轮廓度控制可以引用基准也可以不引用。图 5-12 中引用了一个安装面作为主基准，用来保证零件在检测时的稳定性和可重复性，也反映了零件在总成中的安装状态。实际的零件表面要位于公差带内，并且有尺寸约束、形状约束（包括适当面的平面度），以及轮廓的线元素垂直于基准面 *A* 的约束。

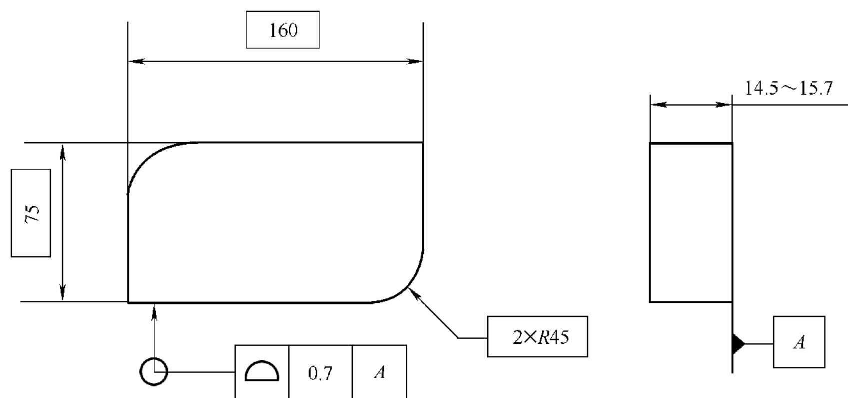


图 5-12　面轮廓度的定义（应用到全部面）

这种检测使用光学比较仪很容易实现。但这种方式的缺点是，如果零件的厚度很大，就

很难探测到受控面的凹处和垂直度。所以先要验证凹处和垂直度，然后才进行轮廓度的检验。

图5-12也可以使用尺寸公差的形式定义。但这个零件由很多倾斜度、半径和尺寸公差，不能避免它们之间的公差累计问题。结果是，加工者按照图样加工的零件往往不能配合到总成中。这种情况和一排列孔的定位方式问题一样，如果孔孔之间定位，最后一个孔很可能超出零件，无法装配。

为了避免这种问题出现在这个零件上，尺寸160mm和75mm，以及两个半径尺寸*R*45在视图中变成公称尺寸。这些特征都由轮廓度公差控制框中的值约束（非图样标题栏中的通用公差值约束）。公差控制框的引线上有一个圆圈，表示这个轮廓度约束应用于零件轮廓的一周。这个连续整体的公差带意味着没有公差累计的问题。根据图样的定义，没有双点画线，表示这是一个等边公差分布，与基本轮廓的内外偏距为0.35mm。注意在拐角处，0.35mm公差带线需要延伸相交，所以拐角点会超过基本轮廓0.35mm。

第三节　轮廓度的综合应用

一、组合公差框控制和独立组合公差框控制的比较

轮廓度控制有独立组合公差控制框和组合公差控制框两种定义方式，它们有时情况意义相同，有时则截然不同。如图5-13所示，在这两种公差控制框中，基准*A*一般用来做垂直度控制，基准*B*和*C*一般用来做定位控制。这两种公差控制方式的意义是一样的，第一行公差控制框定义了一个固定的0.7mm的公差带；第二行定义了一个更严的0.35mm的公差带，这个公差带垂直于基准面*A*，可以在0.7mm的公差带中旋转和平移，且只在0.7mm的公差带内有效。

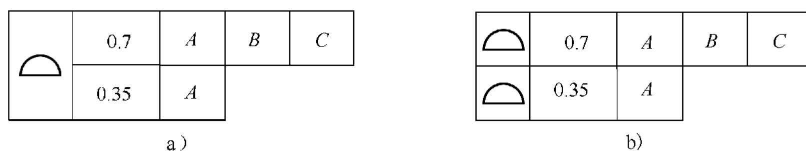


图5-13　轮廓度的两种公差控制框比较

a）组合公差控制框　b）独立组合公差控制框

图5-14所示是一个实际零件的几何公差控制的解释，①为组合公差控制框，②为独立组合公差控制框。它们的第一行公差框用来定位*E*－*F*面垂直于基准*A*，相对于基准*B*和*C*的定位的一个固定的公差带，这个公差带等距分布于理论轮廓面的两侧各0.3mm。而第二行公差框用来约束特征面*E*－*F*垂直于基准*A*，等边分布理论轮廓面两侧各0.15mm的两个等距面，这个等距面公差带可以在固定的0.6mm的第一行公差带内平移和旋转。第一行公差带定义了轮廓面的位置，第二行公差带定义了轮廓面的形状。

这两个公差框的控制方式是一样的，两种公差控制方式的下部公差框都引用了基准*A*。其意义都是对于*E*－*F*面上的线元素垂直于基准*A*的形状控制。两种控制方式的第二行公差带都比上部小，都是对于特征面对基准*A*的垂直度控制加严，同时也是对特征面的尺寸大小和轮廓度的控制。基准*B*和*C*没有出现在下部公差框中，仍然由上部公差框约束，保持



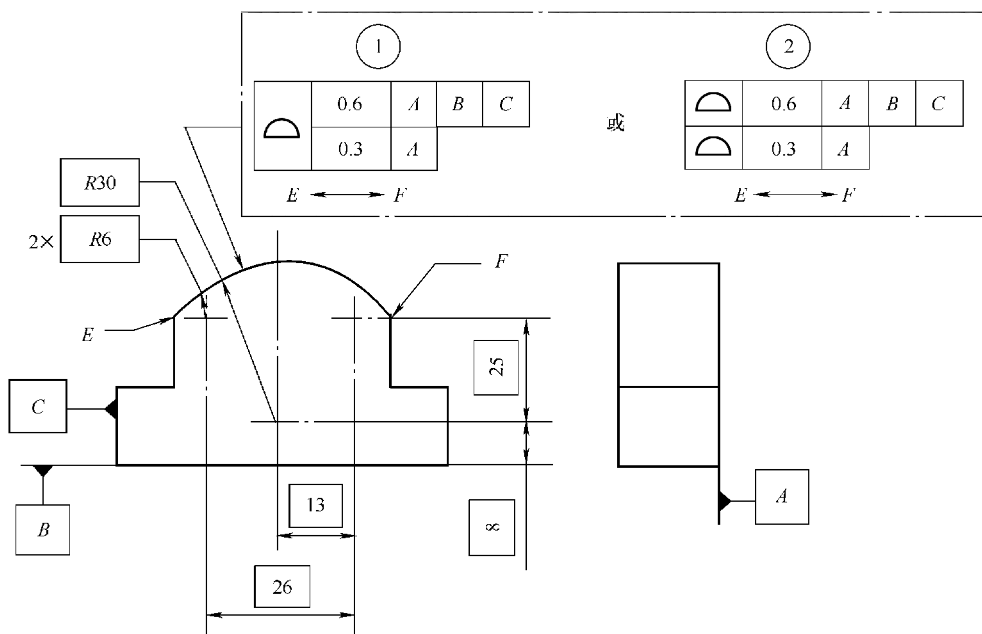


图 5-14　两种轮廓度标注的比较

相对于基准 *B* 和 *C* 的宽松公差约束。

如果下部公差框中都引用了上部公差框中用于定位的基准，如基准 *B*，如图 5-15 所示，两种公差控制方式就会有截然不同的意义。在组合公差控制中，下部公差控制框中引用的基准只是用来约束特征面 *E*－*F* 相对于这些基准的定向，基准 *B* 不再作为定位基准，而是变为平行基准 *B* 的约束。组合公差控制框只能按照上部公差控制框中的顺序引用基准。在这个例子中，第二行公差控制框只有四种情况：①无基准；②参考基准 *A*；③参考基准 *A* 和 *B*；④参考基准 *A*、*B* 和 *C*。而独立公差控制第二行公差控制框中的基准顺序没有特殊要求，可以是任意组合的基准控制。比如其中一种情况，公差框中的主基准在第二行公差控制框中可以作为第二基准或第三基准。

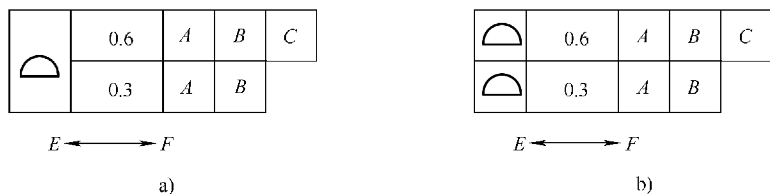


图 5-15　两种轮廓度定义的比较

a）组合公差控制框　b）独立组合公差控制框

独立组合公差控制中下部公差框不但可以有不同于上部公差控制框不同的基准排序，也可以引用完全不同的基准特征，如图 5-16 所示。组合公差控制框却不允许这两种基准设置。

独立组合公差控制中的第二行公差框的基准是对于受控特征面的加严约束，按照通用逻

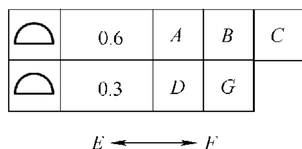


图 5-16　独立组合公差控制框

辑理解，不会变为一个定向（垂直度）约束，具有和上部公差框中基准同样的意义（如定位）。从基准特征上引出的公称尺寸定义了受控特征位置加严控制，使第二行公差控制框被赋予更严的公差控制，加严了受控特征和基准特征之间的定向或定位关系。

图 5-15a 所示的组合公差控制框中，第一行公差控制框为特征面 $E-F$ 定义了一个固定的、整体的公差带，这个公差带约束了整个特征面 $E-F$ 的偏差。受控面必须位于 0.6mm 的公差带之间，此公差带定向（垂直）于基准面 A 和定位于基准面 B 和 C。下部公差框的公差带宽度为 0.3mm，可以在上部公差控制框定义的公差带中浮动，并且定向于基准 B（平行浮动于基准面 B）。实际受控特征面必须位于公差带 0.6mm 和 0.3mm 之内。

图 5-15b 所示的独立组合公差控制框中，上部公差控制框为特征面 $E-F$ 定义了一个固定的、整体的公差带，这个公差带约束了整个特征面 $E-F$ 的偏差。受控特征面 $E-F$ 必须位于 0.6mm 宽的公差带内，此公差带定向（垂直）于基准面 A，并且定位（公称尺寸）于基准面 B 和 C。下部更窄的 0.3mm 公差带相对于基准 C 没有约束，但必须保证与基准 B 之间的公称尺寸位置关系（基准 B 被下部公差框引用，加严了尺寸和轮廓度的控制）和基准面 A 之间的垂直关系。并且下部公差框的定义也隐含了相对于基准 C 的旋转关系。独立组合公差控制框中的第二行公差控制的 0.3mm 的公差带只能沿着基准 B 的位置平移，在基准 C 的方向上可以自由平移。所有的受控特征面 $E-F$ 必须位于公差带 0.6mm 的上部公差控制带内，同时也必须位于下部公差控制框约束的 0.3mm 公差带内。所以，独立组合公差控制比组合公差控制允许更少的零件通过检验。

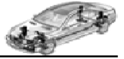
二、轮廓度在不连续面特征上的应用

在图 5-17a 中，特征面从中间断开（例如凹槽），成为两个平面。在这种情况下，特征面被分割成几部分，成为独立的面，简单的形状和定向控制无法满足特征的定义约束。像平面度和平行度控制是无法定义一个公差带，然后约束所有的独立面在这个公差带内的。而面轮廓度可以应用于这种情况，面轮廓度可以创建一个公差带，然后将所有面约束在其内。

如图 5-17b 所示，轮廓度的公差带由两个相距 0.04mm 的平行面组成，两个特征面必须位于其内。如果满足这个轮廓度的要求，这两个受控特征面不仅约束了直线度、平面度和相互的平行度在 0.04mm 之内，而且两个特征面的共面度也在 0.04mm 之内。如果零件高度（10.0mm）的公差带小于 0.04mm，小于或等于轮廓度的要求，那么可以取消这个同面度的定义。尺寸公差［如果是(10.0 ±0.02)mm，不是(10.0 ±0.2)mm］可以起到同图中轮廓度约束一样的效果。

图 5-17 中的尺寸公差带为 0.4mm，所以出于某种功能上的需要，定义了一个更紧的轮廓度公差 0.04mm。尺寸公差在这里不再起轮廓度控制的功能。受约束的两个受控面可以相互有 0.4mm 的偏差。面轮廓的控制允许受控面一致性地在 0.4mm 的公差带内偏移（但是不能超出尺寸公差约束），并且约束了两个特征面的平面度、直线度、平行度和共面度在 0.04mm 的公差带内。

图 5-18 中增加了基准的参考。这两个受控面不仅有直线度、平面度、共面度和相互的



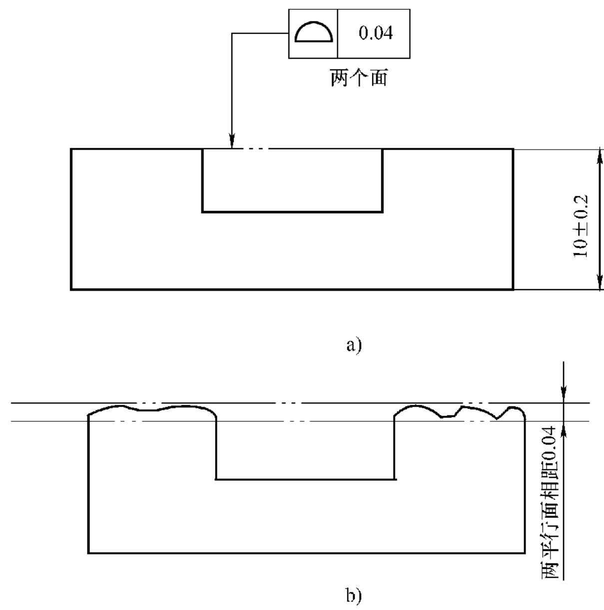


图 5-17　不连续面的轮廓度定义

平行度的约束，也有相对于基准 *A* 的平行度约束。

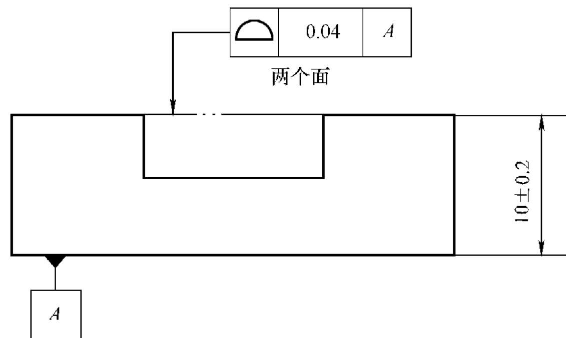


图 5-18　有基准参考的轮廓度定义

图 5-19 又是一种定义方式，高度尺寸被替换成公称尺寸。这个控制中受控面受直线度、

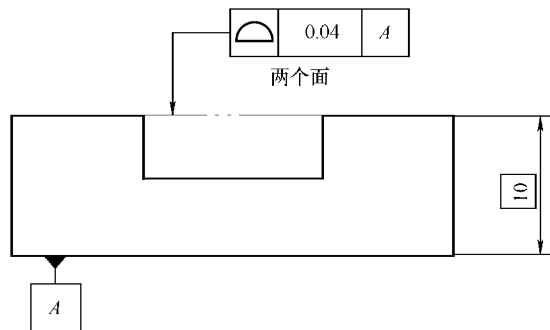


图 5-19　不连续面的轮廓度定义和公称尺寸的关系

平面度、共面度、相互的平行度、相对于基准面 *A* 的平行度和相对于基准面 *A* 的位置度约束。公差带等边分布于相对于基准面的公称尺寸 10mm 定位的基本轮廓两侧，两个特征面不能超出 10. 02mm，也不能小于 9. 98mm。

图 5-20 所示的标注和图 5-19 所示的标注的功能一样，是一个典型的尺寸公差和几何公差的转换例子。

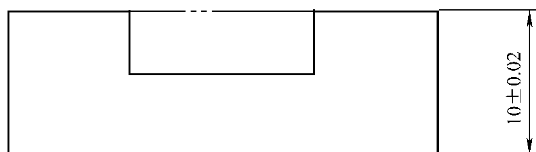


图 5-20　尺寸公差与轮廓度

图 5-21 也是一个共面控制的例子。三个受控面中的两个为另一个受控面的基准面。通常，当多个平面需要被共面约束时，这些平面中的一个或多个面会出于功能上的考虑被当作测量的起始基准面。在这种情况下，分布在最外部的那些面是最好的基准特征。而且公差带虽然也可以做等边分布设置，但从功能上考虑，最好把公差带设置在这些基准特征的高点形成的基准平面的内部。

这样以保证那些不作为基准的平面等高或短于基准平面。只有所有的特征面和基准特征上的元素必须位于公差带之内，才能避免产生不稳定的点。如果基准特征缩短，基准面形成于基准特征面上的高点，等于公差带也随着变动。如果那些没有被设置为基准的特征面上的任何点超出基准面，那么这个受控面也在公差带范围之外。因此，没有不稳定的尖点（这个尖点高于基准特征面上的高点）会存在于公差带之内。

这样就控制了直线度、平面度、同面度和所有受控面的平行度（包括基准面）在公差带之内。在图 5-21 中，公差带不是等边分布的，全宽度在基准面之外（基准面由不止一个基准面特征形成）。组成公差带的平行面相距 0. 04mm。最外部的面同时相切于基准特征面 *A* 和 *B* 的高点（面 *A* 和 *B* 被看作是一个连续的基准特征面）。这种情况，在公差控制框中声明多少个面在公差约束之内是很有用的。

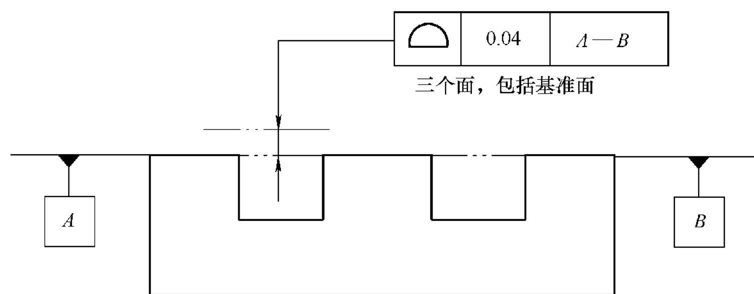


图 5-21　三个不连续面的轮廓度定义

图 5-22a 显示了一个尺寸公差控制平面度、直线度、平行度和同面度（受控面为两个断面和尺寸公差的另一个方向的面，共三个面）。



图 5-22b 显示了一个尺寸公差大于同面度公差的例子。一个进一步约束的面轮廓度（0. 05mm）的控制被引用。本控制的公差带是两个相距 0. 05mm 的平行面，所有受控面元素都必须位于这个公差带之内。

图 5-22c 增加了一个公差带平行于基准面 *A* 的要求。面轮廓度公差控制框中引用了基准特征 *A*。除了保留了图 5-22b 中的尺寸约束为（10 ±0. 3）mm 和平面度、直线度、平行度（相互）、同面度在 0. 05mm 之内，一个额外的控制是受控面特征相对于基准面 *A* 的平行度 0. 05mm 的约束。

图 5-22d 所示把尺寸改为公称尺寸，公差控制框中引用基准面 *A*。除了图 5-22c 中的约束，两个受控面必须位于（10 ±0. 025）mm 的公差带内。

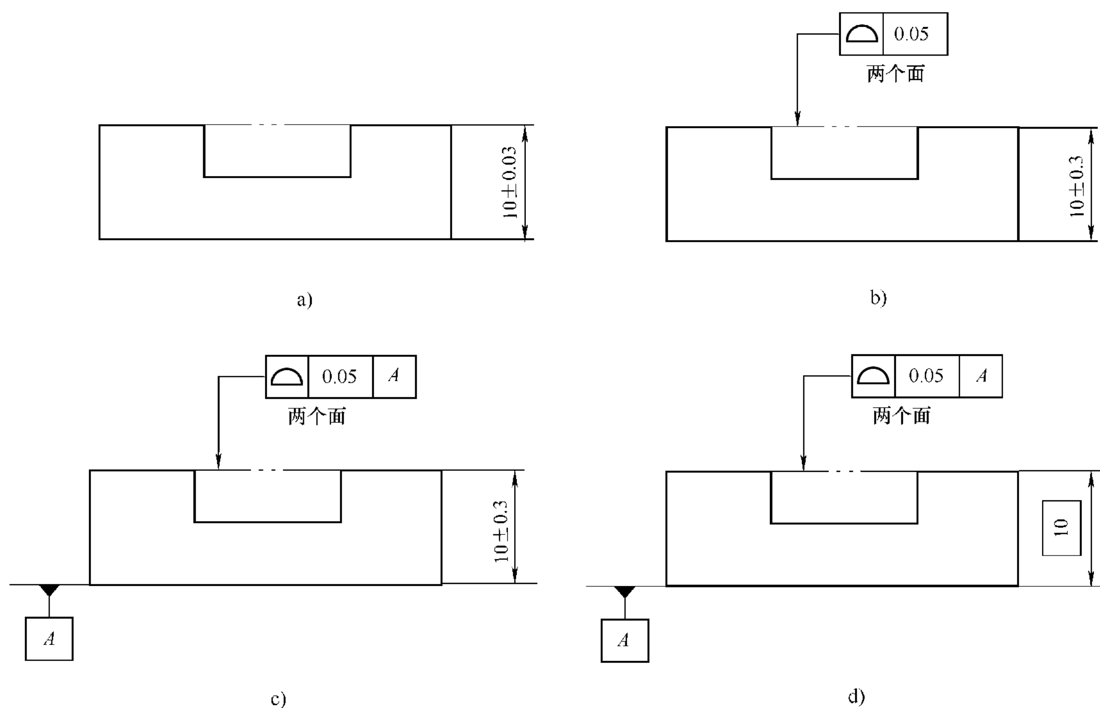


图 5-22　四种不连续面轮廓度定义比较

三、轮廓度的应用及隐含的加工顺序

图 5-23 中零件尺寸的标注隐含了加工顺序。一些特征是另一些特征存在的先决条件。零件毛坯加工的第一道工序是基准 *A* 的几何公差控制，使基准特征面 *A* 符合 0. 2mm 的平面度要求（或者选择本身能够满足这个平面度要求的板材）。作为基准 *B* 的孔相关于基准 *A*，基准 *A* 是基准 *B* 唯一的参考基准。它们的关系是垂直。公差控制框中的几何公差控制方式为垂直度。这个公差框可以解释为：当基准孔 *B* 的尺寸相对于基准面 *A* 为 MMC（ϕ8. 0mm）时，基准特征 *B* 的轴线的垂直度公差带为 ϕ0. 5mm 的圆柱面。这个公差框也隐含着基准特征 *A* 之后才有基准 *B*（基准的顺序性）。

基准 *A* 和 *B* 被定义创建之后，可以开始零件上的其他特征被隐含说明同步创建。这由两

种方式实现：第一，图样中的其他尺寸控制使用基准 *A*（作为用来垂直的主定位）和基准 *B*（作为定位的第二基准），MMC 条件修正（其实效边界相关于基准 *A*，实效边界直径为 ϕ7.5mm）；第二，所有特征在同一种设置状态下生产，并且，如果基准特征 *B* 比其实效尺寸 ϕ7.5mm 大，三孔阵可以容许偏移，必须保证这个偏移是所有的特征在同一方向上同步发生的，这就确保了孔阵仍然能够同步满足功能要求（如装配）。

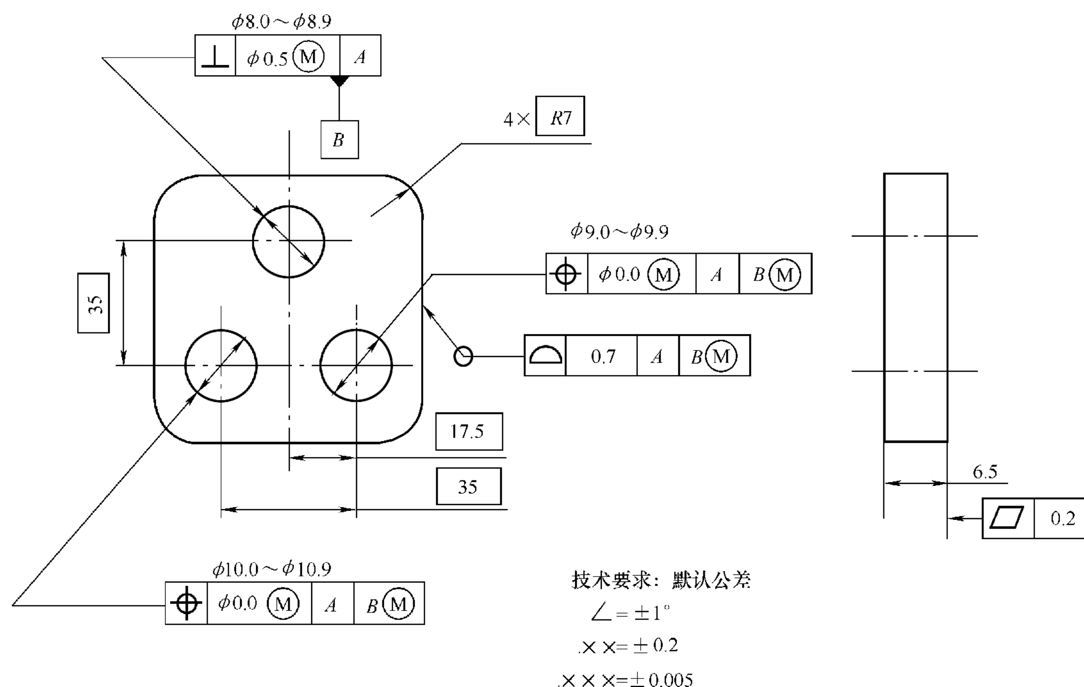


图 5-23　一个零件的轮廓度定义实例

所有这些特征需要配合于另一个零件的相对应特征上。这些特征的相互距离/关系维持在相对固定的位置，能更好地保证零件的装配。这些被基准 *B* 定义的特征向不同方向偏移的允许量取决于基准 *B* 的实际加工尺寸。

在实际加工过程中，如果在不同的加工工序中能控制住零件内的特征相互关系，可不必遵循图样中隐含的加工顺序。检测程序需要确认这些受控特征的相互关系被充分约束，能够作为一个整体被加工。隐含的加工顺序可以非常有效地向图样阅读者传递图样要求，实现零件功能的特征内部约束关系。同零件的三个孔，零件的轮廓度特征作为所有一起组成零件的特征，参考于基准 *A* 和 *B*，关联于其他零件上的特征。

轮廓度是 ASME Y14.5 中功能最多的几何公差控制。轮廓度可以处理许多难题。如果设计者要在几何上定义非规则特征的尺寸、形状、定向和位置的公差，其他几何公差控制方式很难定义，那么轮廓度会比较适合这些情况。通常，轮廓度能够容易地定义一些较难的几何定义的问题。

第六章　几何公差控制——定向控制

定向控制有三种方式，包括倾斜度、垂直度和平行度。其中，垂直度和平行度被认为是倾斜度控制的0°和90°两种特殊应用情况。因为平行度和垂直度应用更广泛，所以独立出倾斜度控制。这三个定向控制都需要参考基准，如基准面、中心面或基准轴，并且这三种控制方式的公差带的单位都是距离单位，不是角度单位。

在考虑尺寸特征的内部关系之前，每一个受控特征都必须看作是一个受其自身尺寸限制的独立特征。如果没有特殊要求，例如，一个用尺寸无关原则控制的特征（比如直线度控制），必须首先检测受定向控制（倾斜度、垂直度和平行度）的特征满足特征整体尺寸在最大实体尺寸（MMC）之内，且每一个截面上直径方向上的相对点的值不小于最小实体尺寸（LMC）。如果受控特征满足这些独立尺寸要求，然后才开始被用来作为内部尺寸参考。这个原则对所有的尺寸相关原则适用。

通常要用到不止一个基准特征在不同方向上来固定一个零件和定义公差带。公差带要求所有受控面、轴或中心面的元素位于其范围内。每一个面上的线元素可能是独立控制的，需要各自验证这些线元素在其各自的公差带范围内（公差带是两条定向于基准的平行线）。应用这种控制方式，常常需要在公差控制框下面给出标注，如“每个线元素”“每个点元素”或“每个径向元素”。如果描述功能，如为了控制定向，一个平面相切于一个特征面，可以在公差控制框中的公差值后面附加符号Ⓣ进行修正。

倾斜度约束了面上的线元素、整个面特征、轴或中心面相对于一个基准面或轴为规定的基本倾斜度尺寸的（除0°、90°、180°或360°之外）一种几何公差控制方式。倾斜度控制可以参考多个基准。平行度约束了面上的线元素、整个面特征、轴或中心面等距于一个或多个基准面或基准轴。垂直度约束了面上的线元素、整个面特征、轴或中心面成90°于一个或多个基准面或基准轴。

对于更具体的倾斜度、垂直度和平行度定义，请见本章内容。

第一节　倾斜度的定义及应用

一、倾斜度的定义

倾斜度可称得上是定向控制中的父系，垂直度和平行度派生于倾斜度，也就是说倾斜度不控制两种特殊的定向角90°（垂直）和0°（平行）。倾斜度约束了面、中心面或轴相对于一个基准面、中心面或轴成一定的倾斜度的公差（注意这里的联合倾斜度控制的角度尺寸是一个公称尺寸）。如果有尺寸公差共同约束，倾斜度公差常被用来作为位置控制的加严要求。倾斜度的公差带通常是两个有规定公差值间距的平行面，也有圆柱面公差带的情况，并且需要不止一个基准来定位。也可能这个公差带是由两条平行线组成的，并且在公差控制框下说明为“每一个线元素”。不管以上哪一种方式，定向公差带的角度值必须为一个公称尺寸（没有公差）。

倾斜度公差控制框必须包含一个倾斜度控制符号和一个倾斜度公差值，并且一定有一个以上的参考基准，还可以使用实体材料修正，如果没有使用最大实体原则（MMC）和最小实体原则（LMC）修正，那么默认为使用不相关原则（RFS）。

定向于基本角上的公差可以是局部定义，如每10mm上的倾斜度控制。这个说明应在公差控制框之外。

倾斜度是定向公差控制，注意倾斜度控制不同于导角或沉孔控制，应用于总成装配中成倾斜关系的特征之间的控制，或者一个特征的成形需要。倾斜度的公差带和通常的角度公差有很大差别，角度的公差如45°±2°之类，而倾斜度公差带是一个距离单位，并至少需要引用一个基准。倾斜度公差在几何公差控制的方式中很容易理解和掌握。

一个倾斜度公差相关于一个公称角度、一个参考基准和一个公差值，注意这里的公差值的单位绝不是度分秒，它表示的公差带是一个给定公差值的距离单位。

测量倾斜度公差时，通常要将零件放置在与公称角度相等的测量平台上垫“平”零件的受控面，这样被测平面就理论上和测量平台在一个平面上，然后检测员就可以使用安装在高度尺千分上的探针对被测面进行全扫描测量，读出波峰波谷的值来验证受控平面相对于基准面的倾斜度。

倾斜度公差控制的应用要素如下：

1）倾斜度公差需要参考至少一个以上的基准。

2）倾斜度公差需要一个公称角度尺寸定义基准面的理论位置。

3）如果没有特殊要求，倾斜度公差带所有情况下都是两个相距给定公差值的平行面或圆柱面，以公称角度值倾斜定向于参考基准。

4）倾斜度公差同时控制了受控面的平面度。

5）倾斜度公差可以应用不相关原则和MMC原则修正。

6）倾斜度公差是距离单位，不能使用量角器测量倾斜度公差。

二、特征平面到基准面的控制应用

图6-1所示是一个最简单的倾斜度控制例子，特征定向于基准面A。图中的倾斜度公差带是两个相距0.3mm的平行面公差带，公差带与基准面A成30°角。基准面A由平面A上的高点形成。这个例子使用RFS，并且也只能使用RFS修正，不能获得公差补偿，就是说在任何的尺寸公差下，倾斜度公差值都是0.3mm。由于尺寸公差的限定，定向公差不能超出尺寸公差限定的MMC尺寸。这个零件的顶部尺寸不能超过20.5mm（MMC）。

加工的受控面必须位于0.30mm的公差带内来满足倾斜度控制。这个控制联合了面的直线度和平面度，并且相当于也控制了特征面的30°角定位。

图6-2所示是一个使用两个基准控制倾斜度公差的定义方法。检测对象要先满足基准A的设置，再设置基准B。通常基准B是一个防止检测特征旋转的约束。应注意的是，这里基准A和B都是方向控制，不定位受控面的位置，所以必定有其他尺寸方式来控制面的位置来完整约束这个特征面。

三、特征轴到基准面的控制应用

倾斜度也可以控制一个孔或轴相对于一个基准面或轴的轴线倾斜度公差。在这种控制



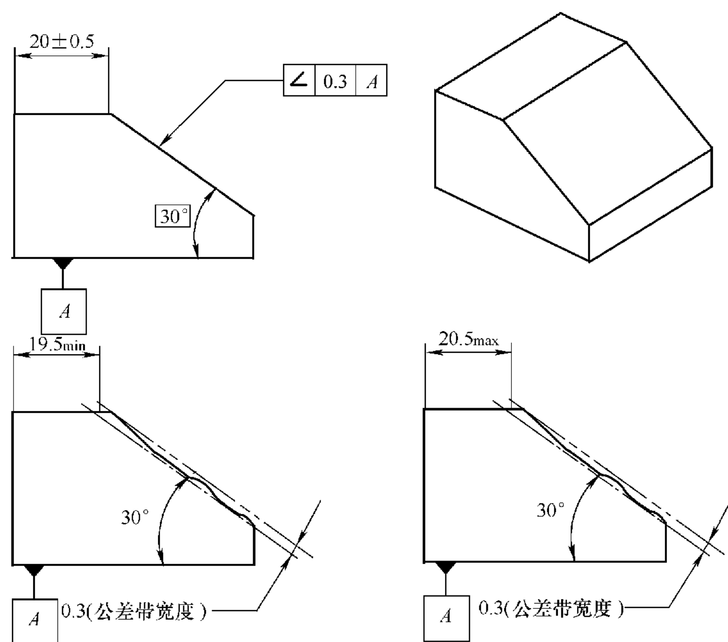


图 6-1　特征平面到基准面的控制

中，必须先定义一个公称角度值。当倾斜度控制包含 0°、90°、180°和 270°，不必标出公称角度，但其实是默认了公称角度值。基准控制框中必须包含一个以上的基准。轴线到面的倾斜度控制公差带通常是两个平行面。当更严格更可靠的要求被提出来的时候，特征轴的定义就需要不止一个基准参考。有时会使用符号 ϕ 在公差值之前，这时候的公差带是一个圆柱面。

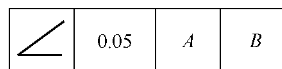


图 6-2　倾斜度的公差控制框

当控制一个孔或轴的轴线相对于一个基准平面的倾斜度时，如图 6-3 所示，特征尺寸可以使用最大实体材料符号Ⓜ修正。如果有 MMC 修正，那么当特征尺寸从 MMC 向 LMC 变化时，倾斜度公差会获得等量的公差补偿。然而，如果孔或轴是尺寸不相关原则（RFS），倾斜度公差带与尺寸公差的变化无关，保持为公差框中的值不变。

图 6-4 所示是一个孔特征被倾斜度定向于另一个孔或轴的轴线上，由于这个轴或孔的基准是被尺寸公差约束的，所以也会有 MMC 和 LMC。所以公差控制框中基准 *A* 也可以被 MMC 条件修正。图 6-4 中，待测孔或轴的直径为 ϕ15.5 ~ ϕ16.0mm。这个公差框定义了一个变量的倾斜度公差值。假设这个待测孔是一个孔特征，可以解释为当基准孔的值为最大实体尺寸时，待测孔特征直径的尺寸为最大实体尺寸（ϕ15.5mm）时，倾斜度公差是 ϕ0.15mm。当孔特征由最大实体尺寸（ϕ15.5mm）向最小实体尺寸（ϕ16.0mm）变化时，倾斜度公差值得到相等的公差补偿。这个目的是为了在公差带允许的范围内增加可用公差带，以降低生产成本。尺寸公差，如孔或轴的直径相对容易加工，而几何公差倾斜度的生产工艺相对困难，成本高。基准 *A* 因为是间隙基准销，当零件插入基准 *A*，基准销 *A* 和基准孔的间隙允许零件在基准框架上浮动一定的量，但这个补偿不做计算，只看作是一种装配的优化。

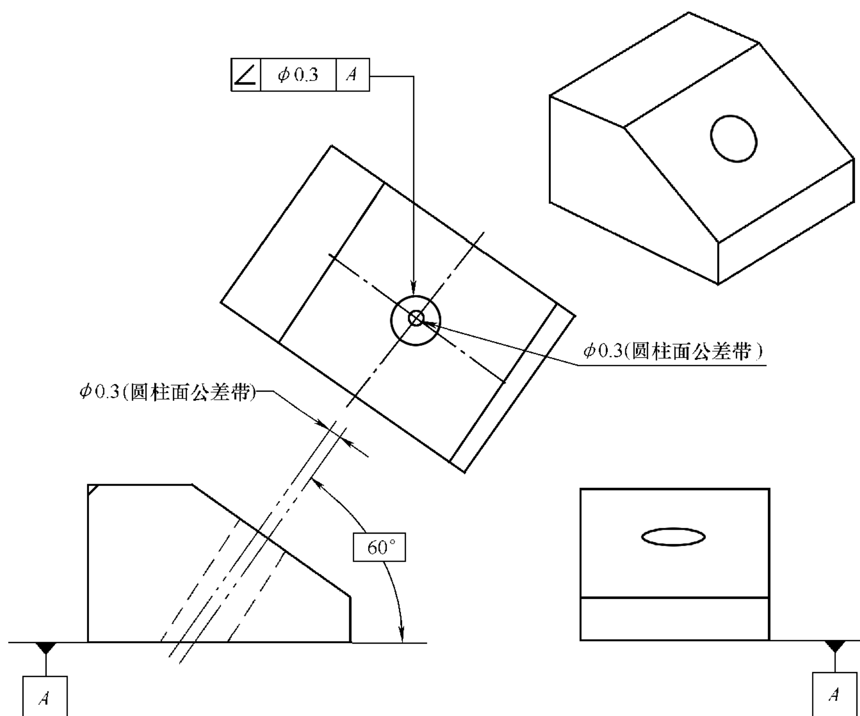


图 6-3　倾斜度对特征轴到基准面的控制（公差应用条件为 RFS）

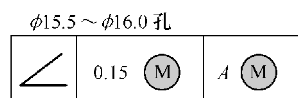


图 6-4　MMC 修正的倾斜度控制

在 MMC 修正的情况下的检验最好使用功能检具。功能检具的尺寸是待测特征的实效尺寸［其计算公式为：实效尺寸（Virtual Condition Size）= MMC ± 几何公差值］，也是最差的匹配条件。功能检具能够自动地适应零件的几何公差。

特征轴到基准面的应用要素如下：

1）特征轴线以规定的倾斜度定位于参考的基准面。

2）公差带为圆柱面或平行面，等长于特征。

3）如果约束一条轴线，倾斜度没有约束这条轴线的位置，只是倾斜方向。

四、特征轴到基准轴的控制应用

图 6-5 所示例子的公差带是这样定义的：一个和特征同长的圆柱面，直径为规定的公差值 ϕ0. 3mm，以 45°的倾斜度定向于基准参考轴，这个例子是基准轴 A。

这里倾斜度控制是特征轴和参考轴线以一定的倾斜度定向的控制（90°除外）。

特征轴以一定的倾斜度定位于基准轴，公差带为一个圆柱面。



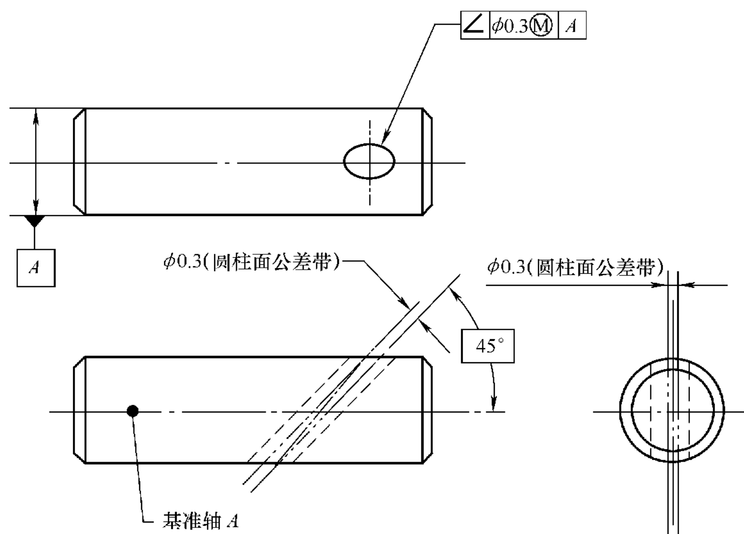


图 6-5　倾斜度对特征轴到基准轴的控制（特征轴必须位于公差带柱面内，此公差应用于 RFS 条件）

第二节　垂直度的定义、应用及检测方法

一、垂直度的定义

垂直度是一个定向公差控制，派生于倾斜度控制。垂直度应用于成 90°关系的特征定义，这些特征包括面、轴和中心面。垂直度必须参考一个以上的基准，面与面的垂直度约束了受控面位于两个相距规定公差值的平行面之间，且这两个平行面垂直于参考的基准面。如果垂直度和尺寸公差联合使用，通常起一个加严公差的目的。垂直度常用于次基准和第三基准特征的建立，如第二基准特征垂直于主基准面，第三基准垂直于第一基准和第二基准。

垂直度公差控制框包含一个垂直度符号、一个垂直度公差和至少一个基准。垂直度可以引用一个以上的基准特征。如果没有使用 MMC 和 LMC 修正，那么默认为 RFS 条件修正。

垂直度的公差带也是距离单位，当定义面或中心面时，可能为两个平行面，平行面的距离为规定公差值；也可能是两条平行线，公差控制框的下方会有说明“应用于每一个线元素”。

垂直度的特点是定向控制一个特征垂直于一个基准面或轴。通常为了检测方便，在图样上都给出一些关键词（如被称为受控特征的“面、轴或中心面”和被称为基准的“基准面或基准轴”）。

受控面可以是任何平面，并且这个平面参考于一个基准面，这个基准面由另一个平面上的高点创建（至少三点接触）。

在图 6-6 所示的例子中，受控特征是一个平面，零件不能超出最大实体尺寸 20.5mm，并且每一个断面的尺寸也不能小于最小实体尺寸 19.5mm。所有受控面（*ab* 面）上的元素必须位于两个平行面之间，平行面的间距为 0.15mm。这两个平行面是想象的，垂直于另一个由基准特征面 *A* 的高点形成的想象的平面。对于这种公差控制，至少需要引用一个基准。

通常为了定向一个公差带，需要用多个基准来完成。

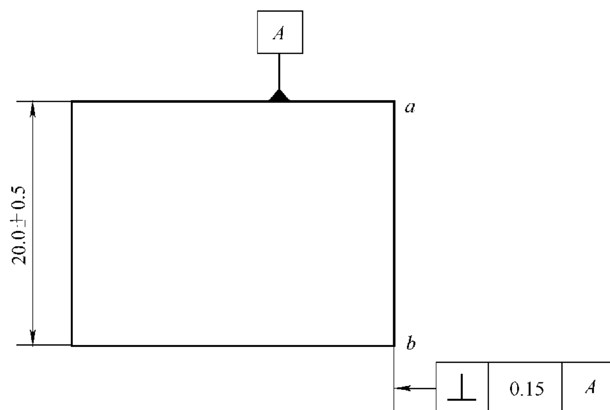


图 6-6　垂直度控制的定义

如果没有 0. 15mm 的公差要求，垂直度默认取图样中通常在标题栏中的角度的通用要求，比如在一定范围的角度适合多大的公差值。垂直度的公差控制框应该联合其他尺寸控制方式定义。垂直度公差控制框直接标在受控特征的引线上。如果垂直度没有使用 MMC 或 LMC 修正，那么不能进行公差补偿。

垂直度的应用要素如下：

1）垂直度必须参考一个以上的基准，且垂直于基准。

2）对于受控面或中心面，垂直度的公差带为两个相距规定公差值的平行面。

3）对于受控的轴线，如果没有声明为一个圆柱面，那么这种情况的公差带为两个相距规定公差值的两个平行面，平行面垂直于基准，可旋转产生无限个可用公差带。

4）在 RFS 修正下，垂直度必须使用数量型工具测量；如果应用 MMC 原则，可使用属性检具测量。

5）垂直度同时控制了受控面的平面度。

二、特征面垂直于基准面的控制

在图 6-7 所示的例子中，这个应用控制了特征平面和基准参考面之间的垂直关系。此控制的公差带为两个距离为规定公差值（0. 3mm）的平行面，平行面定向垂直于基准参考面 *A*。

特征面垂直于基准面的应用条件如下：

1）特征面以一定的倾斜度定位于基准面，并在规定的公差范围内。

2）应用尺寸不相关原则。

3）公差值是两个基准垂直面的间距。

三、特征轴到基准面的垂直度

孔或销轴的轴线到一个基准面的垂直度控制在工程应用中也是比较常见的。如图 6-8 所示，孔的轴线垂直于基准面 *C*，垂直度公差值为一个直径为 ϕ0. 3mm 的圆柱。在这种类型的



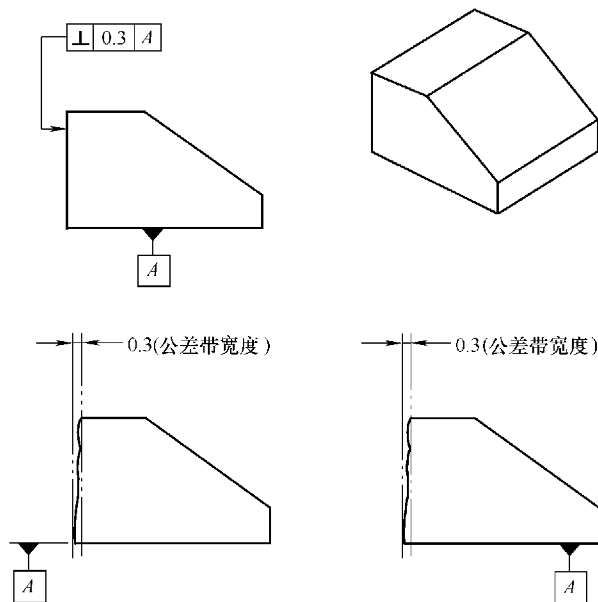


图 6-7　垂直度对特征面垂直于基准面的控制

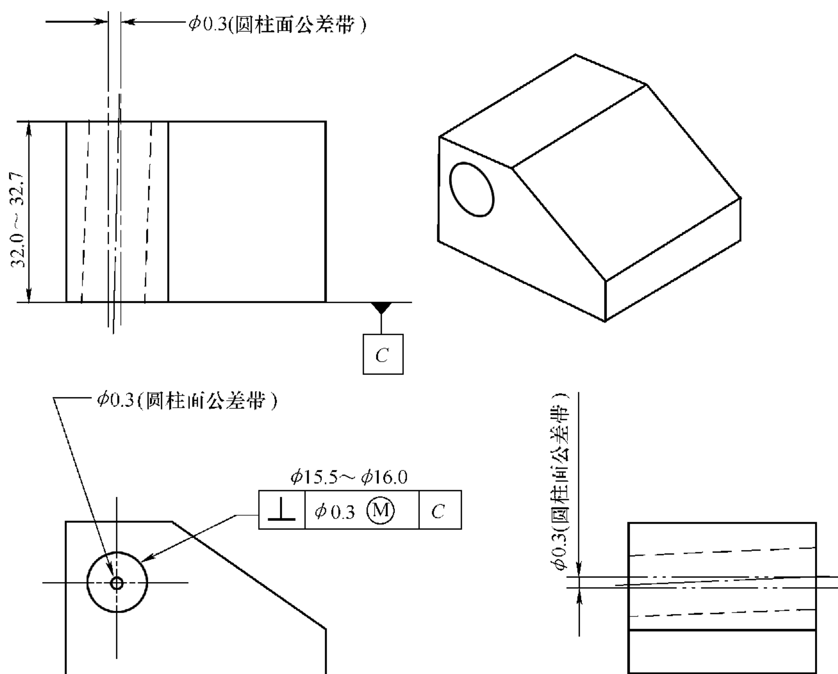


图 6-8　垂直度对特征轴到基准面的控制

控制中，孔的尺寸可以被 MMC 条件修正。当孔的尺寸为最大实体尺寸（MMC）ϕ15. 5mm

时，轴线的垂直度公差为 ϕ0.3mm。其意义是孔的轴线必须位于一个圆柱面公差带内，这个圆柱面公差带直径为 ϕ0.3mm，理想状态是垂直于由基准特征面 *C* 上至少 3 个高点形成的基准面。基准特征 *C* 不是一个尺寸特征，所以基准特征不能使用 MMC 或 LMC 修正。

当孔特征由最大实体尺寸（MMC）ϕ15.5mm 向最小实体尺寸（LMC）ϕ16.0mm 变化时，垂直度公差带获得相应的公差补偿，例如：

当孔的实际尺寸为 ϕ16.0mm（MMC）时，公差带为 ϕ0.8mm。

当孔的实际尺寸为 ϕ15.8mm 时，公差带为 ϕ0.7mm。

当孔的实际尺寸为 ϕ15.7mm 时，公差带为 ϕ0.5mm。

当孔的实际尺寸为 ϕ15.6mm 时，公差带为 ϕ0.4mm。

当孔的实际尺寸为 ϕ15.5mm 时，公差带为 ϕ0.3mm。

可以理解为孔的轴线可以在圆柱面公差带内有一定的倾斜度。这个特征轴线和基准面之间的内在关系创建了一个实效边界。这个实效边界等于最大实体尺寸（MMC）ϕ15.5mm 减去最大实体条件下的垂直度公差 ϕ0.3mm，等于 ϕ15.2mm（ $=\phi15.5\text{mm}-\phi0.3\text{mm}$），是这个孔的配合边界，当然这个实效边界也垂直于基准面 *C*。

作为一个独立的尺寸特征，在做垂直度的检测之前，应该先验证这个孔的尺寸是否合格。不考虑这个孔和基准 *C* 的关系，应当确认这个孔的整体没有小于 ϕ15.5mm（MMC）。然后进行 LMC 检查，就是每个截面直径方向上的相对点不能大于 ϕ16.0mm，如图 6-9 所示。

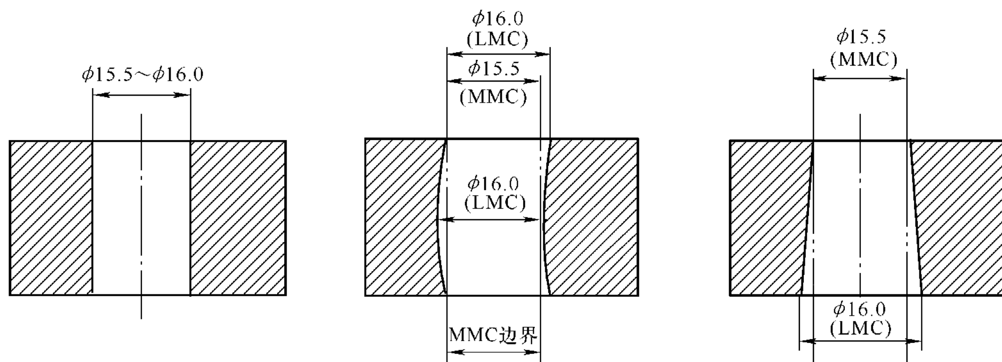


图 6-9　包容法则与垂直度

垂直度控制是一个定向控制方式，所以公差控制框中至少应有一个公差控制符号、一个公差值和一个基准。如果受控特征是一个圆柱面特征尺寸（孔或销轴的），适当的时候也可能需要一个直径符号。对于平面特征，没有直径符号修正的需要。

并且，垂直度允许参考不止一个基准特征。按需要，可以给一个特征更多的定向参考。如果是一个尺寸特征，必须先验证尺寸的约束，再进行受控特征到基准的垂直度的检查。最大实体材料符号可以被用在一个尺寸特征修正公差带内，当特征的尺寸从 MMC 向 LMC 变化时，垂直度公差带可以获得相应的公差补偿。通过提高低成本加工的尺寸公差精度，从而放宽高成本的垂直度公差约束，而不影响零件的功能，可以大大减少零件的加工成本。如果公差控制框中没有使用 MMC 或 LMC 修正，那么即默认为尺寸不相关原则（RFS）。这时尺寸



公差和垂直度各自独立检测，没有公差补偿。

图 6-8 中的垂直度控制应用特征轴线垂直于参考基准面的倾斜度控制，公差框中的直径符号规定了公差带形状。当孔特征的直径尺寸为最大实体尺寸 ϕ15.0mm 时，此控制的公差带为 ϕ0.3mm 的圆柱面。零件公差带的圆柱面长度要大于或等于零件厚度 32.7mm。这个圆柱面公差带定向约束垂直于基准参考面 *C*。

特征轴到基准面的应用要素如下：

1）特征轴垂直于基准面，在规定的公差带（圆柱面）内，圆柱面长度大于或等于特征长度。

2）垂直度可应用尺寸相关或不相关原则。

四、特征轴到基准轴的垂直度控制

这种情况的垂直度控制方式是一个孔或销轴的圆柱面特征垂直于一个基准轴，其本质是一种线相对于线的垂直度控制。其意义是一条特征轴线必须以规定的公差值垂直于基准轴线，如图 6-10 所示。

这些轴是线元素。线之间的垂直定义是，空间中的线相互成 90°角。实际上，一条线可以在空间中做 360°旋转，而不破坏和另一条线的垂直关系。所以，这种垂直度的约束仅仅是控制它们之间的 90°关系。显然在空间关系上，这个公差带是两个平行面。当然也可以约束一个圆柱面公差带来控制一条线相对于另一条线的垂直度。垂直度无法控制一条轴线到一个特征轴的位置关系。位置上的约束可以用来使轴线相交。在轴线相对于轴线的垂直度控制中，受控的尺寸特征的几何公差值和公差框中的基准特征都可以使用 MMC 或 LMC 修正，无 MMC 或 LMC 修正情况下默认为 RFS 修正。

图 6-10 中的垂直度控制应用特征轴线垂直于参考基准轴的垂直度控制，公差框中没有直径符号，所以公差带是两个间距为规定公差值 0.3mm 的平行面。这个平行面公差带定向约束垂直于基准参考轴线 *A*。尺寸特征基准 *A* 可以在公差框中被 MMC 修正，意义是当尺寸特征 *A* 的轴径由 MMC 向 LMC 变化时，整个轴 *A* 因为可以获得一定的倾斜而使被测量的孔的垂直度公差带可以获得补偿，就是说受控孔轴线可以倾斜于基准轴线 *A* 更大范围（>0.3mm），以便更多的零件能够通过检验。

一个尺寸特征相对于一个尺寸基准特征的垂直度（如孔相对于孔，轴相对于轴，或孔相对于轴）是相关联控制，需要引用基准。如果只参考一个基准（用来限制轴线绕基准轴线的旋转），公差带的形状是两个平行面。在不止一个基准参考的情况下，公差带的形状通常被指定为一个圆柱面。这表示设计者需要圆柱面公差带垂直于主基准轴线并且定向于第二基准。如果没有其他要求，每一个尺寸特征本身也必须满足各自的尺寸约束（MMC 的整体尺寸约束和每个截面上的 LMC 约束）。

实效边界尺寸在这里可以用来控制特征和基准轴线之间的相互关系。公差控制框中的公差值可以小于或大于尺寸公差值。如果在公差控制框中公差值和基准后面都没有 MMC 或 LMC 的修正符号，意味着尺寸特征和基准特征都应用 RFS 原则。如果 MMC 符号出现在公差值后面，当尺寸特征偏离 MMC 时，垂直度公差可以获得等量的补偿。如果基准特征后面有 MMC 修正，那么当基准特征尺寸偏离 MMC 时，受控特征公差带可以获得一个补偿量，相当于同基准特征间的相互约束宽松。

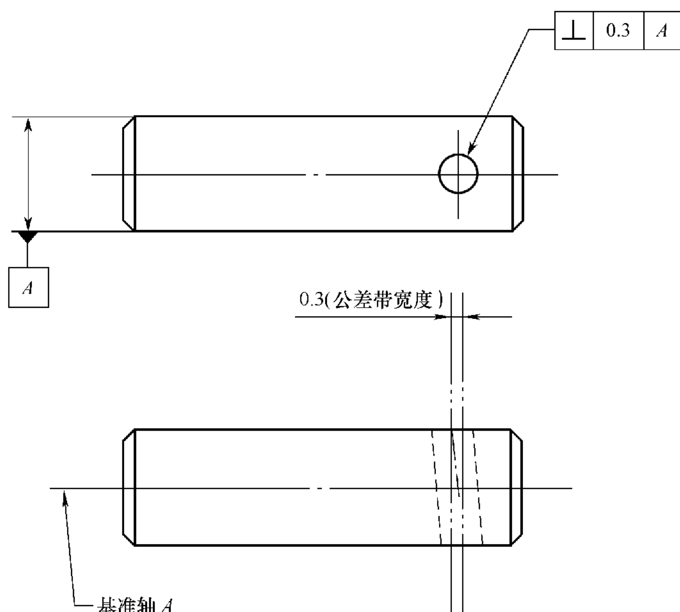


图6-10　垂直度对特征轴到基准轴的控制（此公差应用条件为RFS）

特征轴和基准轴的垂直度应用要素如下：

1）特征轴和基准轴之间的定位，特征轴位于给定的公差带内（两个平行面）。

2）垂直度可应用包容原则或尺寸不相关原则。

五、中心面对基准轴的垂直度应用

图6-11所示是中心面对基准轴的垂直度应用实例。公差控制框中使用了MMC修正，意义是当槽宽大于最大实体尺寸35.4mm时，垂直度公差可以得到公差补偿。要明确的是，中心面的平行面公差带垂直于基准面 *A*，并垂直于基准面 *B*，而不是定位于 *B*，所以这个槽孔还需要一个格外的位置定义。

这个垂直度约束可以解释为：当槽口的宽度为最大实体尺寸35.4mm时，此槽的中心面的公差带为两个平行间距为0.20mm的平行面，且平行面垂直于基准面 *A* 和基准面 *B*。

下面继续完善对于凹槽特征的定义。图6-12所示给出了两种定位槽孔的方式。第一种方式使用公称尺寸，公称尺寸定义了槽中心位置的起点，也是槽中心面垂直度的公差带的平行面的中心面的位置。第二种方式使用尺寸公差定义了位置公差带，位置度公差带的宽大于垂直度公差带，位置度公差带在这里的功能等同于垂直度公差带，也是垂直于基准面 *A* 的两个平行面，并定向定位于基准面 *B*。垂直度公差带在宽度为1.0mm的尺寸公差带内浮动。没有垂直度约束时，尺寸公差带按照几何公差的原则一，可以在这里替代垂直度约束。没有位置尺寸的约束，垂直度不能替代位置度公差带。

应用RFS原则，即没有MMC修正的约束的情况如图6-13a所示。图6-13b所示是垂直度的检测示意图。检具块是一个正好能配合入槽孔的检具。千分尺读数器运动方向垂直于基准面 *A*，平行于基准面 *B*。千分尺读数器沿纵向方向移动距离等于槽深。如果读数器移动全



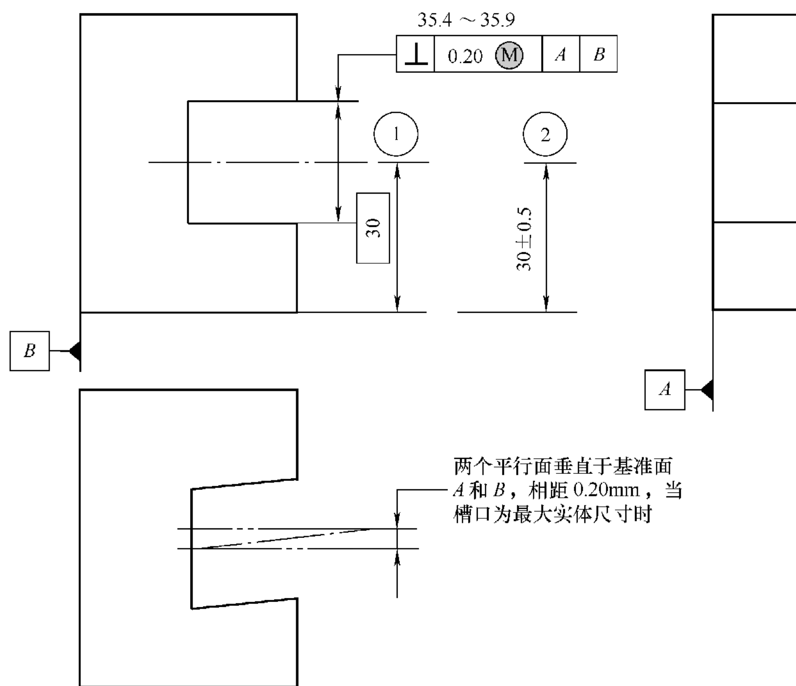


图 6-11　中心面对基准轴的垂直度应用实例

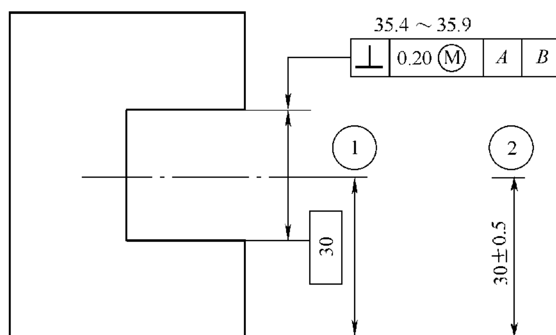


图 6-12　公称尺寸与尺寸公差的对比

量（FIM）读数超过 0. 20mm，则该零件为不合格产品。

六、两种垂直度标注方式的比较

图 6-14 中的两种标注方式会被误认是相同的几何公差控制方式，事实上这两种方式是很不同的。图 6-14a 所示是轴的轴线受垂直度约束，在轴为最大实体尺寸 ϕ11. 6mm 时，垂直度公差带为 ϕ0. 25mm 并垂直于基准面 *A* 的圆柱面。当实际加工的轴的尺寸偏离于 MMC

时（变小，在尺寸公差范围内），垂直度圆柱面公差带可以变大，允许更大的垂直度偏差。基准面 *A* 没有平面度的控制。基准面 *A* 由基准特征面 *A* 的至少三个高点形成。

如图 6-14b 所示，受控特征是零件的底面。这个受控面必须在两个平行面公差带之间，平行面相距 0.25mm。这两个想象的平行面理想地垂直于基准轴 *A*，当轴 *A* 尺寸为最大实体尺寸时（ϕ11.6mm），垂直度公差为 ϕ0.25mm。所有受控特征（零件的底面）的元素必须位于两个平行面之间。因此，这种方式不但控制了垂直度，也控制了 0.25mm 的平面度。受控面不是一个尺寸特征，这个特征不能被 MMC 条件修正。因此，0.25mm 的公差带不能得到补偿。受控面的平面度因此被保证。

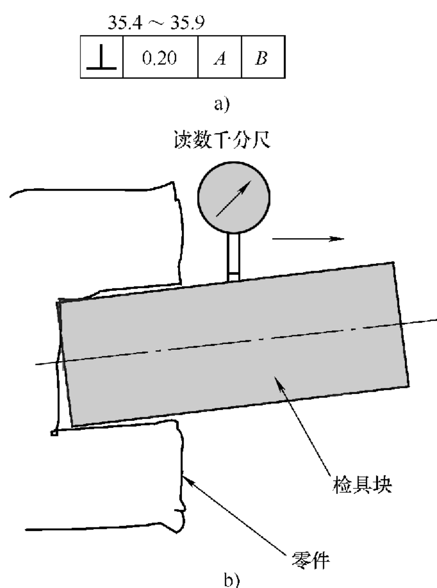


图 6-13　RFS 修正的垂直度检测

但是图 6-14b 所示方式中基准引用了 MMC 修正原则，当基准特征 *A* 偏离 MMC（基准轴 *A* 的尺寸变小，但在尺寸公差范围内），控制零件底面的公差带允许相应的浮动。两个平行面公差带相距 0.25mm 不变，所有的受控面的元素必须位于这个公差带范围内。当轴径变小时，平行面公差带可以倾斜一定数值满足垂直度要求（定向宽松）。这等同于增大了垂直度公差，但是平面度仍然保持 0.25mm 不变。

七、垂直度的综合应用

图 6-15 所示是一个垂直度的典型应用实例，零件的主基准面是 *A*，次基准面是 *B*。对于基准 *B*，定义的方式是使用垂直度。垂直度通常用类似的方式使用定义第二基准。这里基准 *B* 的尺寸使用 MMC 修正，理论的基准尺寸是 ϕ46.72mm。当然在实际生产中需要考虑 10% 的磨损和加工误差。

在图 6-16 中，MMC 条件下的实效边界由尺寸特征的最大实体尺寸和尺寸公差特征的几何公差产生。如图中显示，4 个孔的尺寸不能超出实效边界 ϕ8.2mm，以满足独立特征的位置度约束。4 孔阵的实效边界理论上恰好以基准特征轴 *B* 为中心（ϕ34mm 的圆）。但是由于在 4 孔阵的公差控制框中基准特征轴 *B* 被 MMC 条件修正。4 孔阵可以获得公差补偿，偏移基准轴 *B*，基准特征轴 *B* 的尺寸小于其实效边界 ϕ46.72mm。

这个 4 孔阵的整体浮动成立条件是当 4 个孔的实效边界相互成 90°，位于 ϕ34mm 的分布圆上，并垂直于主基准 *A*。因为基准特征 *B* 可以被加工成最小尺寸 ϕ45.9mm。理论上，如果在这个尺寸时，理想状态地垂直于基准面 *A*，4 孔阵的分布中心可以偏离第二基准轴 *B* 的公差带为 ϕ0.82mm。这个效果就是 4 个实效边界孔可以整体地偏离第二基准轴 *B*。



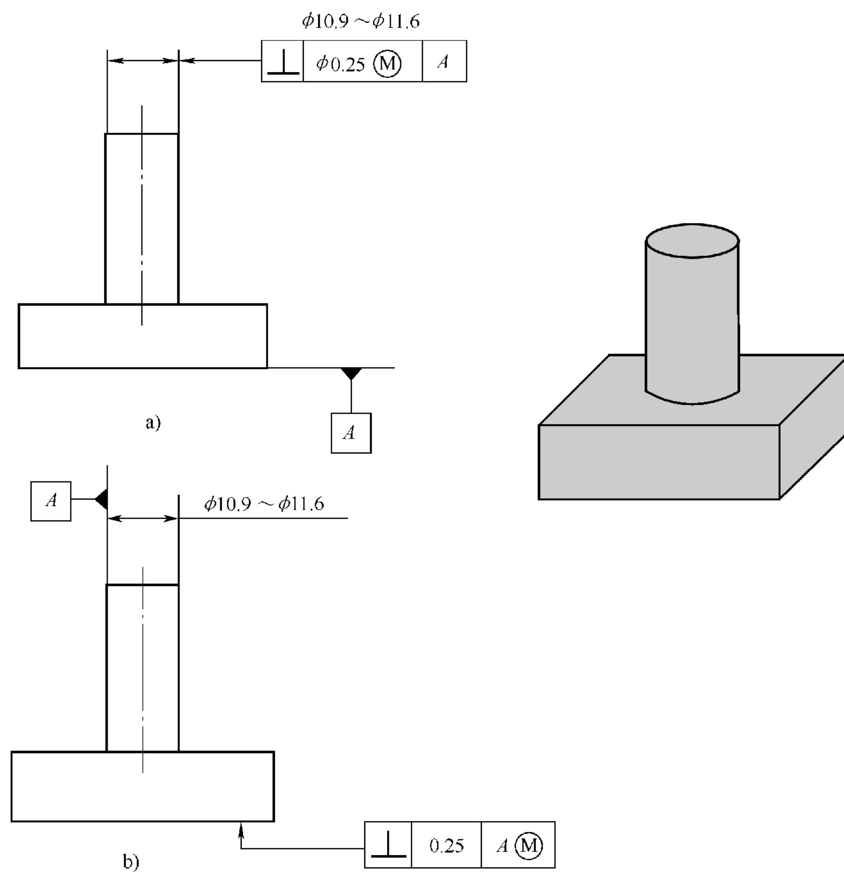


图 6-14 两种垂直度标注方式的对比

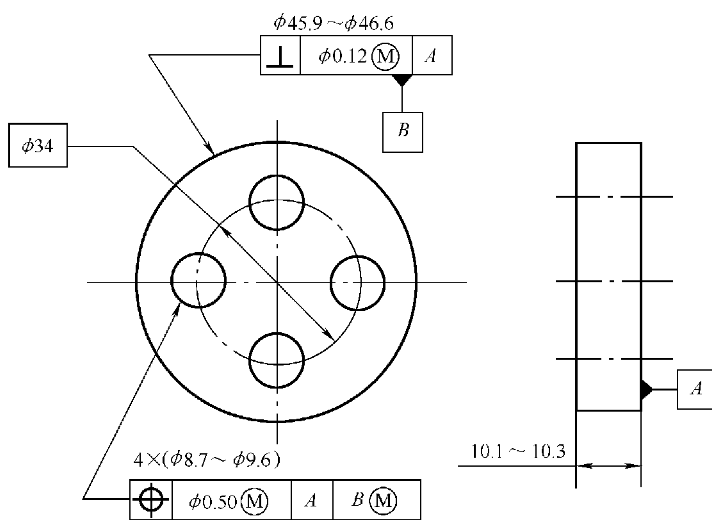


图 6-15 位置度与垂直度联合定义的实例

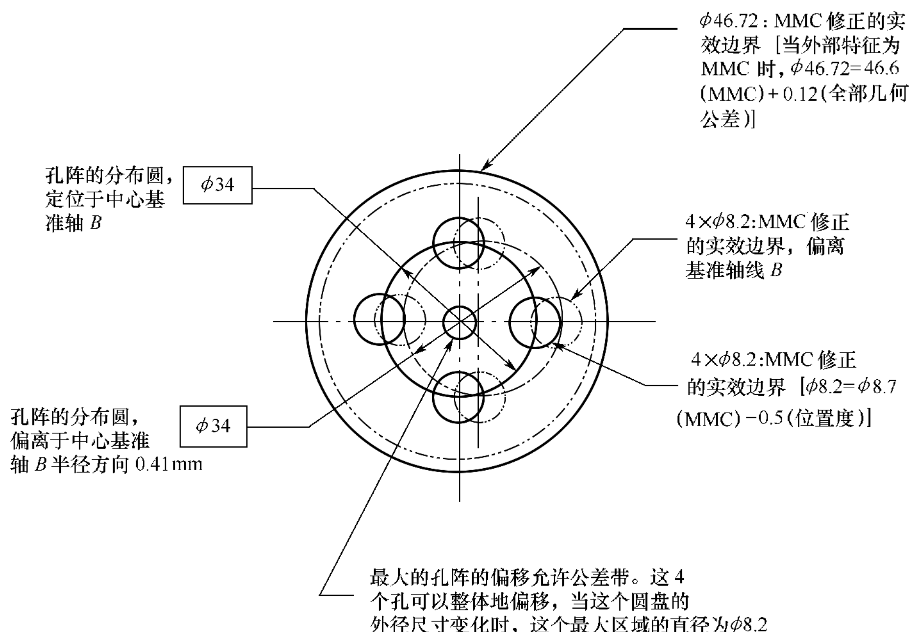


图 6-16　公差带图示

如果零件和一个有 4 个销的圆腔体零件配合，如果 MMC 修正 4 个孔的位置度公差控制框的基准 *B*，那么零件允许浮动。只要这个圆盘可以装入销腔内，不论偏移与否，都可以让零件通过检验。这种装配可能导致旋转零件的不平衡和质量分布不均匀。这个整体的浮动也等于是对 4 个孔的位置度放松约束。每一个孔的 MMC 和 LMC 分别独立验证。

八、垂直度的测量

图 6-17 所示是垂直度的测量设置。其方式通常是将一个角板放在一个面板上，然后把零件基准特征和角板夹在一起，保证至少有三点的接触，以便在角板上建立一个模拟的基准。角板放置在一个测量台面上，开始进行受控面和模拟基准面的垂直度检验。测量设备是一个带读数器的高度千分尺，千分尺的探针接触受控特征面，扫描整个面。如果任何面上点的读数指示器移动全量（Full Indicator Movement，FIM）大于公差控制框中的值（这里是 0. 15mm)，则可以认为特征面不在两平行面的公差带区间，不满足垂直度的公差带要求。由于平行度也是一个两平行面的公差带约束（但没有定向)，由此可知，如果约束一个面垂直于基准面 *A* 在 0. 15mm 的公差带范围内，那么这个面的平面度是 0. 15mm，FIM 的读数也应该小于 0. 15mm。

如图 6-18 所示，基准特征 *A* 在一定的高度夹持在两个 V 形架之间。这个设置是为了模拟最小的基准特征的外圆柱面。一个带读数器的高度千分尺用探针接触待测特征面，测量垂直度。组成公差带的两个平行面垂直于基准轴（这个非常相似于全跳动中面对基准轴的几何公差控制方法)。要验证垂直度时，将高度千分尺的探针在待测特征面上做全扫描，即读



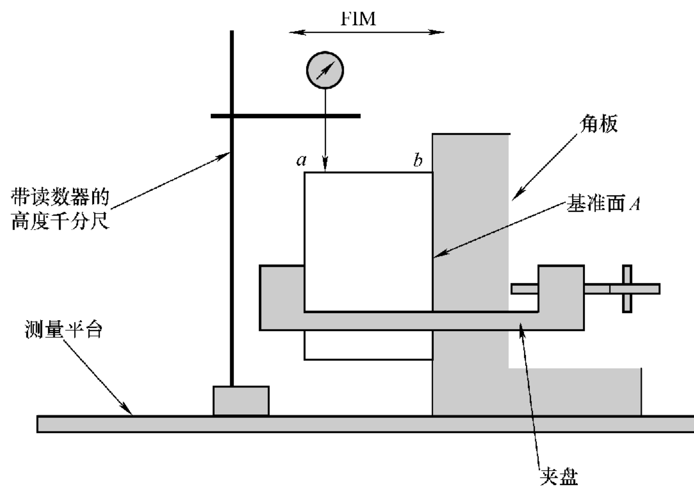
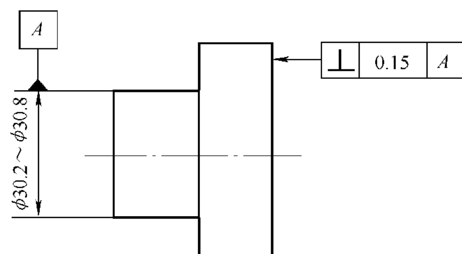


图 6-17　垂直度的测量设置（一）

数指示器移动全量（FIM）检测，记录下读数器的数值。如果移动全量读数没有超过公差框中给出的垂直度数值，那么这个零件通过检测。这个控制也约束了特征面相对于基准轴的平面度、直线度和垂直度。



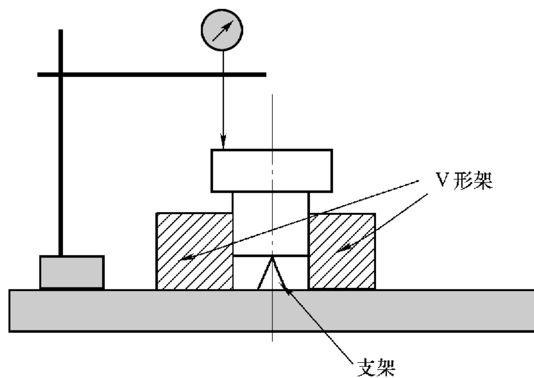


图 6-18　垂直度的测量设置（二）

第三节　平行度的定义、应用及检测方法

一、平行度的定义

平行度是方向公差控制系列中的一种，是倾斜度为0°的情况。平行度应用于平面、中心面或轴平行于基准面或轴的情况。平行度经常应用在非曲面特征上，或加严定义比尺寸公差要求更窄的情况。平行度控制需要至少一个参考基准。

对于面特征的平行度特征控制框，通常由一个平行度控制符号、一个平行度公差值和至少一个基准组成。辅助基准用来进一步定向公差带，也就是辅助零件在工作状态（以一定的方向装配于总成中）下进行检验。

尺寸特征的中心面平行度公差控制框，通常包含一个平行度控制符号、一个平行度公差值和至少一个基准，可以使用MMC修正，RFS是默认条件。

平行度的公差带为距离量，通常是两个平行面。这个平行面公差带之间的距离是公差控制框中的值。平行度的公差带也可以是两条平行线。如果需要平行线形状的公差带，需要在特征控制框下标出“每个线元素”。

特征轴的平行度公差控制框通常包含一个平行度符号、一个直径符号、一个公差值和至少一个基准，可以使用MMC或LMC修正这个公差控制，RFS是默认条件。

平行度是定向控制公差类型的一种。这个定义需要说明受控特征平行的对象，换句话说，基准特征必须出现在公差控制框中。平面度能够控制平面、轴、孔、凸缘或槽等平行于基准面或基准轴。特征控制框中要包含不止一个基准特征。其中的辅助基准用来进一步约束受控特征在公差带之内。平行度控制就是用来约束受控特征在规定的公差控制带之内的，即等距于一个基准面或基准轴。

如果公差带被定义为两个平行面，并且基准为一个平面，则受控特征为一个平面。如图6-19所示，零件不允许超出MMC（25.5mm），每一个断面尺寸不应超出24.5mm（LMC约束）。所有受控面元素必须位于两平行面之间（相距0.3mm）。这两个想象的平面公差带平行于由基准面上至少三个高点模拟的基准面。

几何公差控制原则一要求没有几何公差约束，如没有0.3mm的公差带平行度约束，尺寸公差用来控制面的形状（如直线度、平面度和平行度）。因此，没有几何公差控制，尺寸公差用来替代控制两个面的平行度公差在1.0mm（±0.5mm）之间。因此，如果再使用平行度控制公差框，那么一定是对于1.0mm公差更严的约束。这个约束没有MMC、LMC或RFS修正，也不存在实效边界。

平行度的公差带取决于受控特征和参考的基准类型。例如，如果受控特征是一个平面且参考基准也是一个平面，那么这种情况的公差带就是两个理想的相距规定公差值的平行面。如果平行度用来控制一个孔的轴线和另一个孔的轴线，那么定义的公差带就是一个圆柱面。第三种情况是，一条轴线平行于一个基准平面的约束，这时公差带不再是一个圆柱面，而是两个相距规定公差值的平行于基准面的平行面。

平行度公差带判断的原则如下：

1）如果基准是平面，那么平行度的公差带是两个面。

2）如果基准是轴线，那么平行度的公差带是圆柱面。



二、特征面到基准面的控制应用

如图 6-19 所示，这个例子的公差带由规定了以公差值 0. 3mm 为距离的两个平行面构成，这两个平行面定向平行于基准参考面。这个平行度不影响尺寸公差，所以最大实体尺寸是 25. 5mm，最小实体尺寸为 24. 5mm。

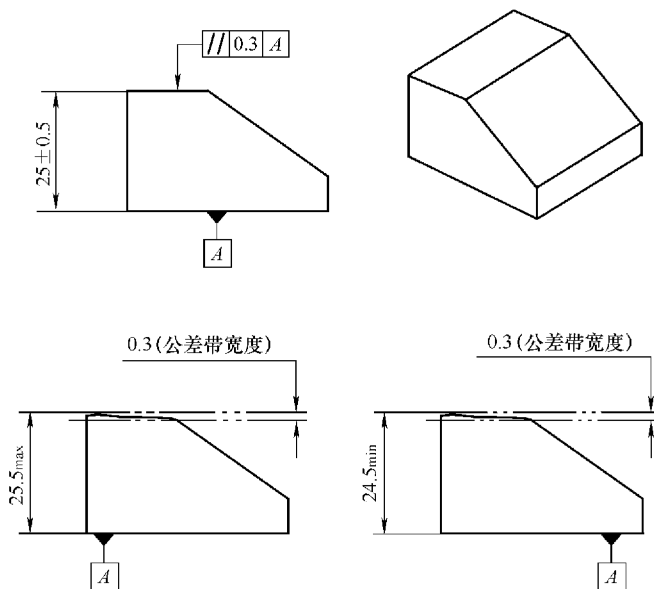


图 6-19　平行度对特征面到基准面的控制

受控特征和参考基准都是面的平行度控制的测量相对简单，但是要注意的是，千分尺和卡尺不能够完成这项检测。以图 6-19 为例，模拟的基准 *A*（基准 *A* 自身也必须满足 10% 的被测量件的公差精度，即基准面 *A* 的平面度必须小于 0. 03mm）必须与零件的 *A* 面至少保持三个高点接触，以保证测量的可重复性，所以卡尺的接触面积不能满足这个要求。这里对基准面的要求相等或大于零件的 *A* 面。

三、特征轴到基准面的控制应用

如图 6-20 所示，轴到基准面的平行度控制的公差带是两个平行面，孔的轴线约束于两个平行面之间。这个平面以理想状态平行于基准特征 *A* 上至少三个高点模拟的基准面。ϕ（6. 4 ±0. 3）mm 的轴必须首先作为一个独立特征进行检验，然后再考虑基准面 *A* 与轴的关系。作为一个独立的尺寸特征，孔必须整体上不小于 LMC（ϕ6. 7mm），并且所有断面直径方向上相对点尺寸不应大于孔的 MMC（ϕ6. 1mm）。只有当这个这个尺寸公差约束满足，才可以进行下一步的平行度检测。本例中此特征孔应用 RFS 条件（几何公差原则二），因此孔的平行度和尺寸公差成不相关原则，孔的轴线平行度公差带必须在固定的尺寸公差带 0. 6mm 间距的两个平行面中平移或旋转。

既然几何公差是一个孔的轴线的定向控制，特征控制框中的平行度可以大于或小于轴的尺寸公差带。这个控制不是孔的尺寸的加严约束，而是对于其他公差控制框（如通用倾斜

度公差形成的平行度控制的加严或者由于某个距离控制导致的平行度约束）的加严控制。

出于功能上的考虑，设计者可能定义一个轴或孔的轴线平行于一个基准面来定位轴线，前面讨论过这种公差控制的情况，事实上轴线在这种情况下无法定位。这需要后面章节中的位置度控制来完成。这种情况下，孔或轴的轴线只是约束了孔或轴相对于基准面的定向（对齐）程度，而非一个定位约束。

如图6-20所示，受控特征为一条轴线，参考基准为一个基准面，所以这个例子的公差带由两个平行面构成，这两个平行面的间距为规定的公差值，相距0.3mm，且平行于基准参考面。注意这个公差的控制方向。由于平行度不是定位公差，所以这个例子的尺寸不完整，还要给出这个孔的公称尺寸或尺寸公差来完整定义这个孔。

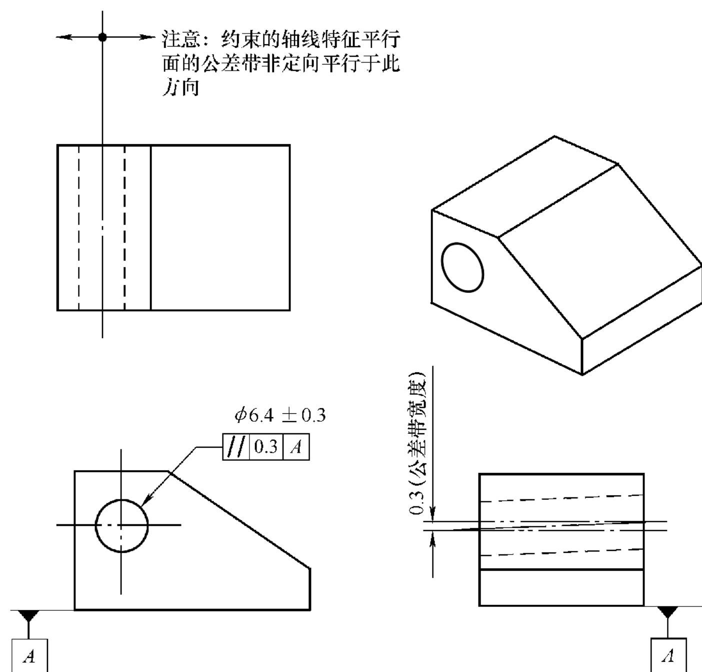


图6-20　平行度对特征轴到基准面的控制

图6-21所示是一个平行度控制的高级应用的例子，没有定义所有尺寸。这个工程实例比较接近实际应用。图中，孔必须先定位约束于零件上，然后出于功能考虑，引用平行度进行一个孔的轴线的加严约束（更小的公差带）。位置度控制定义了一个固定于基准面 A 的 ϕ0.25mm 圆柱面公差带（当孔为最大实体尺寸 ϕ9.7mm 时）。

当孔的尺寸变化时，这个位置度公差带是一个变量，但是位置不能浮动，永远距离基准面 A 为16mm。如果孔的尺寸被加工为 ϕ10.3mm（LMC）时，位置度的公差带直径为 ϕ0.85mm。位置度公差带定位于基准面 A 为16mm，平行于基准面 A，相交于基准轴 B，并平行于基准面 C。

实际孔的基准轴必须同时满足在位置度公差带内和加严的平行度公差带内（这个例子平行度应用RFS条件）。平行度的公差带固定为 ϕ0.10mm，不随尺寸变化，这个加严的公差带约束了孔轴线的平行度，在位置度的圆柱面公差带内浮动。

平行度公差带在图6-21中只是一种加严约束，与位置约束无关。因此，平行度公差带



和位置度公差带内没有确定的位置约束，但必须绝对平行于基准面 *A* 和 *C*。这里的基准 *C* 是一个比较重要的特征，在位置度控制和平行度控制中同时引用，约束了两个公差带之间的关系，需要在加工和检测时对基准 *C* 的设置保证一致性。

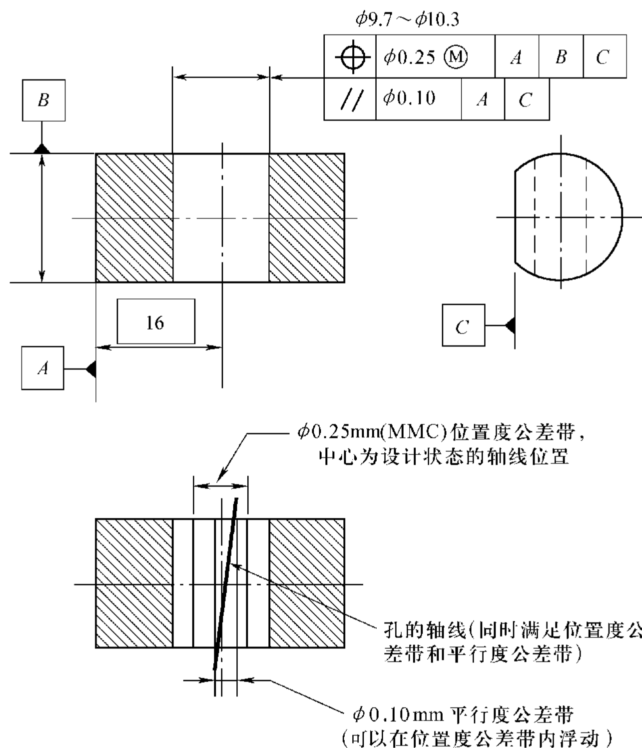


图 6-21　平行度应用实例及公差带图示

四、特征轴线到基准面的平行度控制一个应用特例

图 6-22 参考了两个基准。这种情况的检测设置也很简单，容易实现。应当注意的是，主定位基准和次定位基准的设置。主定位基准面要至少三点接触后，与次定位基准至少两点接触，以实现测量的可重复性。

图 6-22 中所示的公差带为一个圆柱面 ϕ0. 3mm，长度等于特征长度，受控圆柱面特征的轴线（理论上存在，即这个特征的理想设计状态）定向平行于参考基准面，这个例子里为基准面 *A* 和 *B*。圆柱面的直径需要定义尺寸公差值。

要注意的是，这个平行度使用了两个基准控制，设置时要保证这个特征首先和基准面 *A* 平行，然后和基准面 *B* 平行，并且公差带的长度为特征长度。

五、特征轴线到基准轴线的控制应用

这种情况是受控特征轴线平行于基准轴线的约束，公差带为一个圆柱面。在尺寸不相关的情况下，只能进行数据测量，不能使用属性检具检验。

在图 6-23 中，定义了一个特征孔的轴线平行于一个基准轴 *A*。这个平行度约束的公差带为一个圆柱面，直径为规定的公差值 ϕ0. 1mm（RFS 原则），公差带长度等于特征长度，

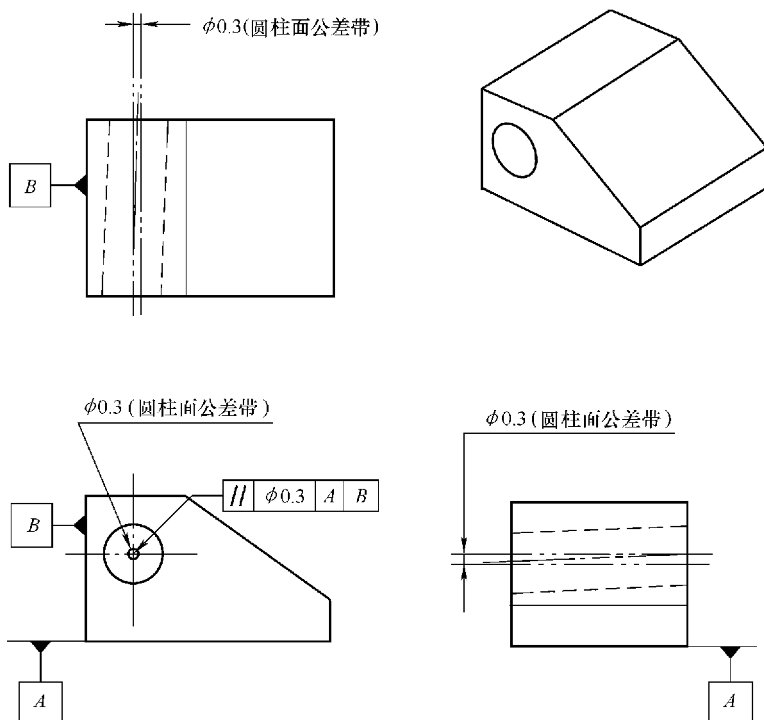


图 6-22　平行度的一个应用特例（应用条件为 RFS）

所有孔的轴线元素必须位于这个 ϕ0.1mm 的圆柱面公差带内。在验证平行度这个内部关系之前，先要确认这个特征的 MMC 和 LMC。

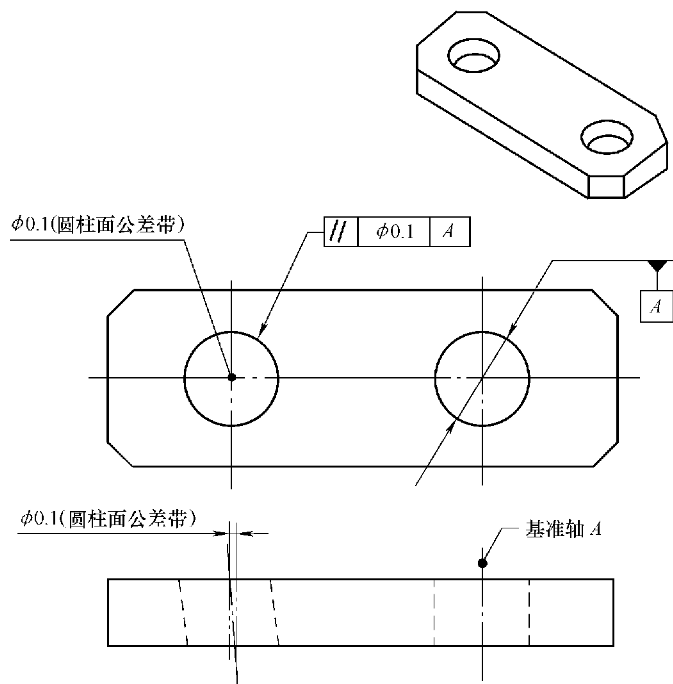


图 6-23　平行度对特征轴线到基准轴线的控制（此公差应用条件为 RFS）



平行度应用要素如下：

1）平行度控制必须参考至少一个基准。

2）平行度公差带取决于受控特征和参考基准。

3）在 RFS 修正时，平行度无法使用属性检具检验；在 MMC 修正时，可以使用属性和数值检具检测 MMC 时的尺寸。

4）平行度控制一个平行面时，同时控制了这个平面的平面度在规定的公差范围内。

5）平行度应用尺寸不相关原则，即最大边界不能超出 MMC。

6）平行度的测量方式是 FIM。

六、平行度与平面度的区别

平行度经常和平面度混淆，它们之间的区别是，平行度需要参考基准，而平面度不需要。如图 6-24 所示，一个矩形零件必须至少三点接触基准参考面 *A*，在接触面的相对面的理论位置的每一侧产生 0.05mm 的公差带（两个平行于基准面 *A* 的面），被定义的平行度的面必须位于这个公差带之内（两个假设的平行面之间）。

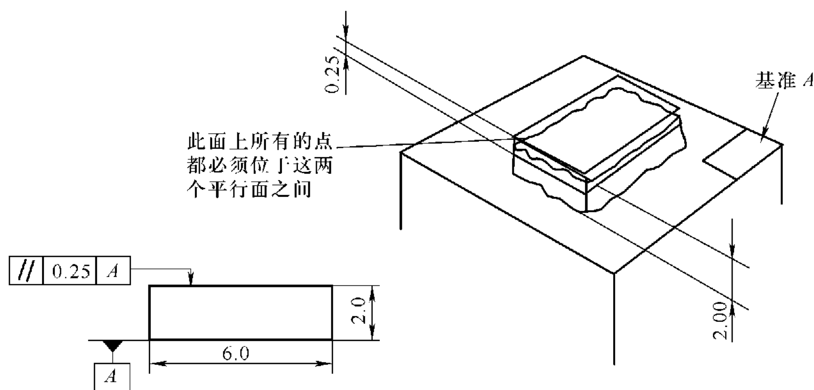


图 6-24　平行度的公差带

图 6-25 显示了一个平面度的规定，可以看到没有基准面引入。一个最优近似面（三点接触）定义一个中间面，面上所有的点必须位于这个平面的两个平行面之间，每一侧的距离为 0.125mm。虽然整体看来，零件偏斜，但这个上平面仍然满足平面度的要求。

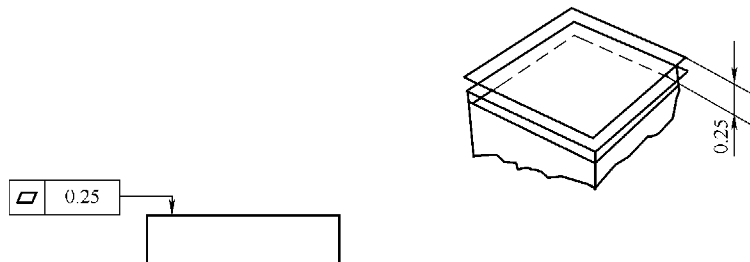


图 6-25　平面度的公差带

第七章　几何公差控制——定位控制

定位控制包括同心度（同轴度）、对称度和位置度。同心度和对称度两种控制方式相似，只是应用在不同的特征上。同心度通常用来控制一个旋转特征的中点和基准轴线之间的关系，而对称度是控制相对平行面的中心面和一个基准面的关系。这两个控制都需要参考一个或多个基准特征，并且只应用尺寸不相关原则。

位置度控制不同于同心度和对称度，它的功能更强大。位置度可以控制特征的距离、同轴和面的对中性。通常位置度都要参考基准，当没有基准参考的时用来控制受控特征间的相互参考关系，可以应用尺寸不相关原则，也可以应用相关原则，受控特征可以被 RFS、MMC 或 LMC 修正，基准也可以被 RFS、MMC 或 LMC 修正。

第一节　同心度（同轴度）的定义、应用及检测方法

一、同心度（同轴度）的定义

同心度是对旋转体上的直径方向上的相对点元素的中心点的控制，也应用于对两个或更多的径向分布的特征的控制。受控特征上所有的中点落在这个零件的基准轴线（或点）上。同心度的公差带是同轴于基准轴线的圆柱面或同心于基准点的球面。这些面特征的中间点云是由特征面上直径方向上的相对点产生的，必须位于公差带内。同心度只应用尺寸不相关原则。在一些需要动态平衡控制或旋转的零件上会有同心度控制的应用。同心度公差可以使用 FIM 输出读数判断，但是 FIM 测量不是很适合的，因为 FIM 同时判断特征的圆度，但同心度对圆度不做要求。通常同心度可以被跳动替代。跳动可以控制特征的同心度，也可以控制特征的形状，如圆度（圆柱度）。

为了确认零件的同心度是否合格，需要确认中点点云和基准轴线的关系。这需要对受控特征面做不同的测量来实现。这种方式可以测量不同的成形面（包括非圆形面），取得面上每个元素 180°上的相对点的值，产生的点必须位于允许的圆柱面公差带或球面公差带内。

同心度常用在旋转功能的特征上。这种方式控制了特征面上每个元素直径方向上的相对点的中点位置，推荐应用于当跳动控制对于特征面的形状控制过于严格要求的时候。特征的中点必须位于和基准轴同心的圆柱面公差带内。同心度不要求做 360°FIM 测量，对于形状没有严格要求。同心度可以控制一个零件的几何特征基于基准轴线的平衡。

在图 7-1 中，受控特征不是圆柱面轮廓，但是基准特征是圆柱面。这个定义中需要控制零件特征面的中点和基准轴线之间的关系，当零件绕基准轴线 A 旋转时，特征的质量分布均匀。很明显，这个零件绕基准轴线 A 做 360°旋转进行 FIM 测量时，无法判断是否复合同心度的定义，但可以比较 180°特征面上相对点的 FIM 输出是否在允许范围内（例子中这个公差是 ϕ0. 10mm）。

无疑这是一个耗费时间的程序。如果其他几何公差控制方式能够满足定义，不推荐使用同心度控制。不论加工还是检测，同心度控制都耗时耗力。但是另一方面，由于同心度对形



状没有过多要求，相对于跳动控制，加工的成本应该更低。因为跳动控制不但要求同心，也要求是圆的。

同心度检测特征面的中点是否位于同轴于基准轴线的圆柱面或同心于基准点的球面特征，经常用来控制做旋转运动的零件的平衡能力。同心度可以参考一个或多个基准来建立或定向基准轴线，也可以使用复合基准建立基准轴线。根据几何公差原则一规定，尺寸公差约束必须优先满足。

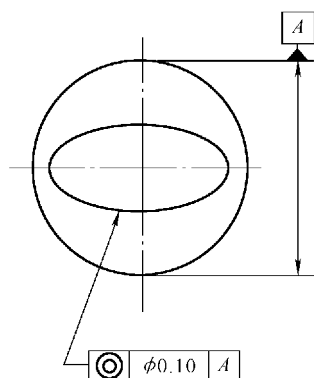


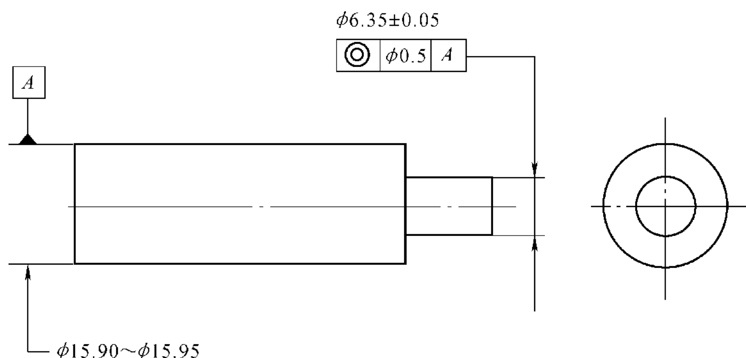
图 7-1　同心度与特征的形状关系

同心度公差只应用尺寸不相关原则，无论在公差值框内或基准框内，都不适宜使用 MMC 修正。同心度公差可以小于或大于特征尺寸公差约束。同轴关系可以由位置公差定义。跳动和轮廓度控制可以定位一个面到基准轴。

在图样标注时需要注意，尺寸约束不能控制同轴、中点或面特征之间的关系。这些关系需要其他方式约束，以避免图样尺寸定义的不完整。

二、同心度的应用

图 7-2 所示是同心度的控制应用例子，同心度的检测需要专门的仪器，测量需要专业人员，而且测量需要大量的时间，不能使用 V 形架上旋转轴的方式来测量，V 形架的方式实际上是圆跳动控制检测。



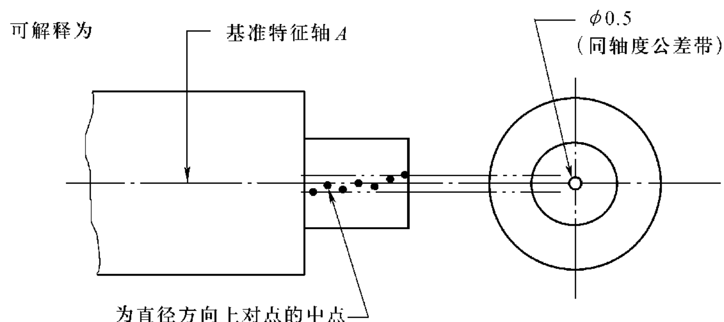


图 7-2　同心度的定义及公差带

在图7-2中，在尺寸范围内和RFS条件下，所有直径方向上对点的中点必须位于一个ϕ0.5mm范围内的一个圆柱面公差带内。这个圆柱面和这个特征的理论轴线同轴，即基准轴*A*，同心度仅能应用于RFS条件。

三、同心度的测量

图7-3所示是一种错误的测量同心度的设置方式。这个台阶轴的同心度公差带是一个想象的ϕ0.2mm的圆柱面，同轴于基准轴线*A*。受控特征面的中线计算方式是由每一个特征面上的点与直径方向上的相对点读数的平均值求得的。由此得到一个沿着轴线方向上的点云，也就是这个特征面的中线。对于合格零件，这些点云必须位于规定的ϕ0.2mm的圆柱面公差带之内。

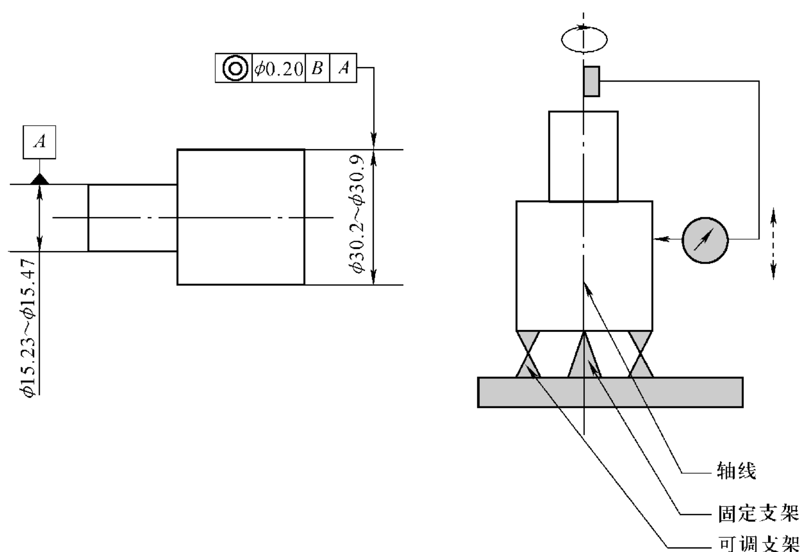


图7-3　错误的同心度的测量设置

这个设置错在零件的基准轴线的建立。按照定义，这个基准轴线应该是由基准特征的最小包容圆柱面（与基准特征面上高点接触的最小圆柱面）建立的。如图7-4所示，基准*A*由卡盘形成的最小包容面建立，千分尺在180°直径方向上的相对点上检测ϕ0.20mm同心度公差带。第三组点的顶点读数是－0.30mm，而底点读数是＋0.12mm，得到中点位置为－0.21mm[＝(－0.30mm－0.12mm)/2]，超出规定的公差值ϕ0.20mm。

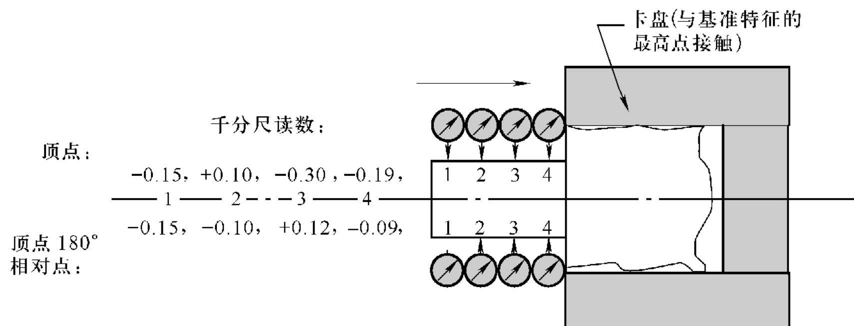


图7-4　同心度的测量设置



图 7-3 中的基准轴线的建立方式不适当，不会得出同图 7-4 中一样的精确读数。但是图 7-4 中的卡盘很难实现，实际检测中很难为每一个零件单独配一个能包容最小基准的外围面的卡盘。千分尺的探针应该测量尽可能多的点，保证测量的点有代表性。基准轴是由基准特征上的代表性的高点建立的。

图 7-4 中的测量方式也可以应用于内部特征面的测量上。通常这种测量都是由计算机辅助实现的。

同心度是一种同轴控制，经常应用于旋转件，目的是控制平衡、质量的均匀分布、壁厚和其他功能用途的零件。同轴度的要求非常严格，需要详细分析零件轴的位置信息，这种方式相比较跳动控制，虽然测量检测设置复杂，却没有提供相应的有效的质量分布控制，所以在设计旋转零件时最好使用跳动控制替代这种控制，对于非旋转零件使用位置度来控制，这样更加节省成本且易于控制。

应注意一点的是，跳动控制约束了质量的对中性，跳动控制是一个首选的设计工具。跳动的应用上来说和同心度几乎是相同的，对于非旋转件，最好用位置度在不相关原则修正下进行控制。因此，有必要深入了解同心度这种公差控制的局限性和检测的难度。

同心度（同轴度）的应用要素如下：

1）同心度是轴对轴的关系。

2）同心度总是要求基准参考，且检测时零件需要做 360°的旋转。

3）同心度的公差带是一个圆柱面，这个圆柱面以基准轴为轴心，直径为规定的公差值。

4）同心度只能被不相关原则（RFS）修正，当需要应用 MMC 修正时，选择位置度控制替代。

5）测量同心度时，检测者需要定位基准轴和受控特征轴，然后确认受控轴是否在圆柱面公差带范围内。

6）同心度的应用很少见，也应该避免使用，因为其检测成本很高，最好使用跳动或位置度控制替代。

四、同心度和跳动的区别

同心度和跳动是非常不同的几何公差控制，但是它们却有着共同的特点。所以它们之间经常混淆。这两个控制都应用于旋转零件，都要求被测特征旋转 360°来测量，都需要定义一个基准特征来定义一个基准轴，并且都用来控制零件的质量分布。虽然这些控制相似，但结果或测量方式却有很大的不同。

如果一个零件的结构是同轴的一个圆柱台和一个六角棱柱，如图 7-5 所示，这两个特征是同轴的。圆跳动在这里实现不了 FIM 检测。这个例子是两种不同的几何公差控制的区别之处。圆跳动是面对轴的关系，而同心度是轴对轴的关系，可以想象，跳动控制能更有效地控制旋转零件，并且更容易测量。

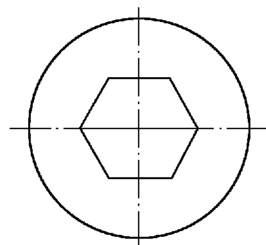


图 7-5　同心度可以应用的特征形状

为了测量同心度，即偏离中心轴线的距离量，必须评估受控特征轴的位置。因为同心度是应用于轴的关系，而

不是面的关系。

第二节　对称度的定义、应用及检测方法

一、对称度的定义

对称度控制一个尺寸特征与另两个特征或一个尺寸特征均匀对中（等距），比如要求一个特征处于一个零件宽度上的中点。对称度是对受控特征上相对点元素的中心点的控制，如中心面和中心线。理想受控特征上所有的中点必须落在这个零件的中心面（或中心线）上。对称度的公差带是两个相距规定公差值的平行面或平行线，等边分布于参考的基准面两侧。这些特征面的中间点云是由特征面上的相对点产生的，必须位于公差带内。对称度只应用尺寸不相关原则。对称度公差可以使用 FIM 输出读数判断。

对称度通常被认为可以被位置度取代，因为位置度也可以定义矩形特征（如槽、凸缘等）的对中性，并且位置度可以应用 MMC、LMC 或 RFS 修正（对称度只能被 RFS 修正），所以使用位置度定义特征能够使对称约束同时满足装配约束。

所以对称度控制一度取消。但在 1994 年，ANSI Y15.5 委员会重新引入这个功能符号。这主要是考虑到，同心度也约束了特征尺寸的对中，并且同心度的概念和对称度相同，它们只是在控制特征的外形上有差别。同心度控制圆形特征，而对称度控制平行平面特征，但位置度可以实现同心度和对称度的控制。更需要注意的是，对称度和同心度都要求使用 RFS 原则，位置度没有这样的限制，可以被 RFS、MMC 或 LMC 修正。所以曾经在一个短暂的时期，同心度和对称度都被位置度取代过。

但是人们后来发现，对称度和同心度的概念和位置的概念还是有差异的。位置度控制一个匹配特征的轴线或中心面。例如，位置度控制一个孔的最大内切圆柱面的轴线（可以想象为插入这个孔的最大检具销）和一个轴的最小外切圆柱面的轴线位置。位置度所关心的是这个最大内切圆柱面的轴线或最小外切圆柱面的轴线是否在位置度公差范围内。

二、对称度的应用

如图 7-6 所示，在尺寸范围内和 RFS 条件下，所有受控面的相对点的中点必须位于一个相距 0.5mm 的平行面包容的公差带内。组成公差带的两个平行面等边分布于基准面 *A* 的两侧，对称度只能应用于 RFS 条件。这意味着模拟中心基准面 *A* 时，应取基准特征 *A* 的最小包容面。

对称度的应用要素如下：

1）对称度控制通常出于装饰或外观的目的，并非为了功能用途。

2）对称度的功能是将受控特征均匀分布在参考基准两侧，满足对称度约束的零件可能会不能完成装配。

3）对称度需要参考至少一个基准。

4）对称度只能应用不相关原则（RFS），不能被 MMC 或 LMC 修正。

5）因为只能被 RFS 修正，所以对称度不能应用属性检具。



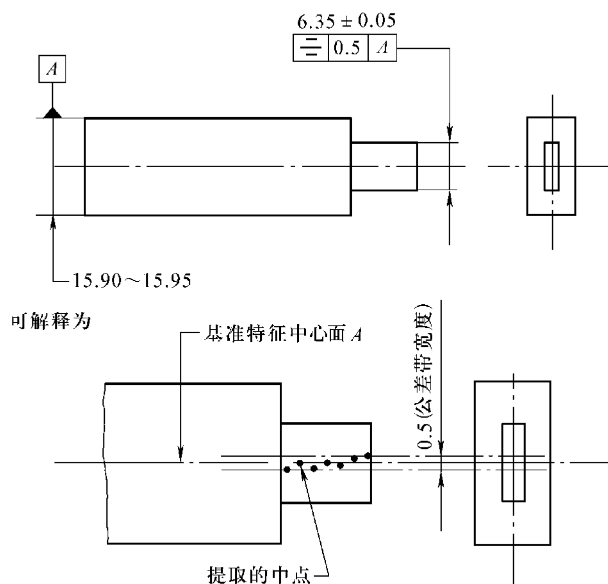


图 7-6　对称度的定义及公差带

三、对称度、同心度和位置度的对比

图 7-7 所示为对称度的定义。其中图 7-7b 是对图 7-7a 的解释。

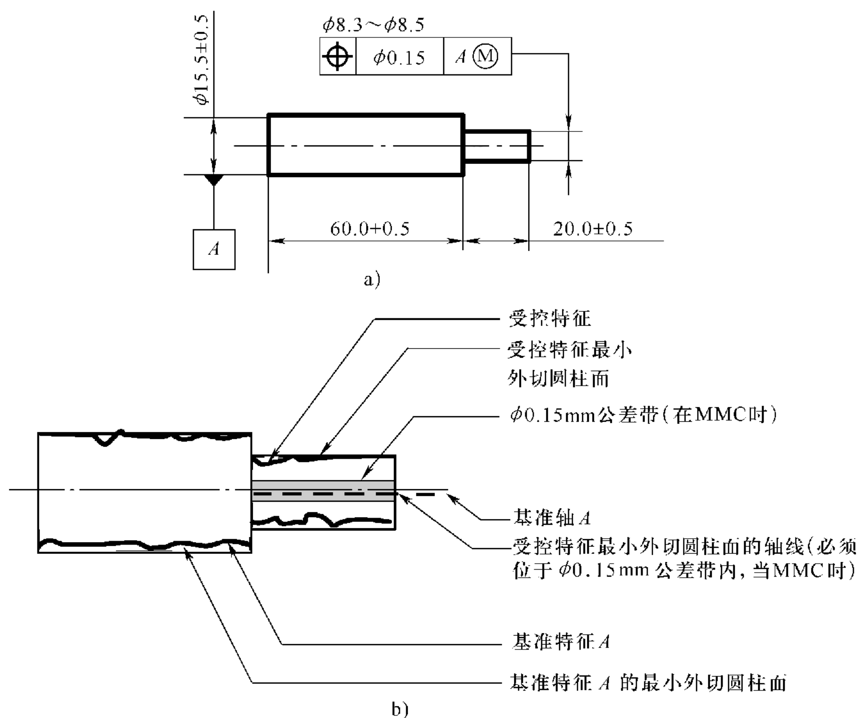


图 7-7　位置度的定义

同心度关注的不是装配问题，而是控制特征面的 180°位置上相对点的中点点云位置。同心度的定义如图 7-8 所示。

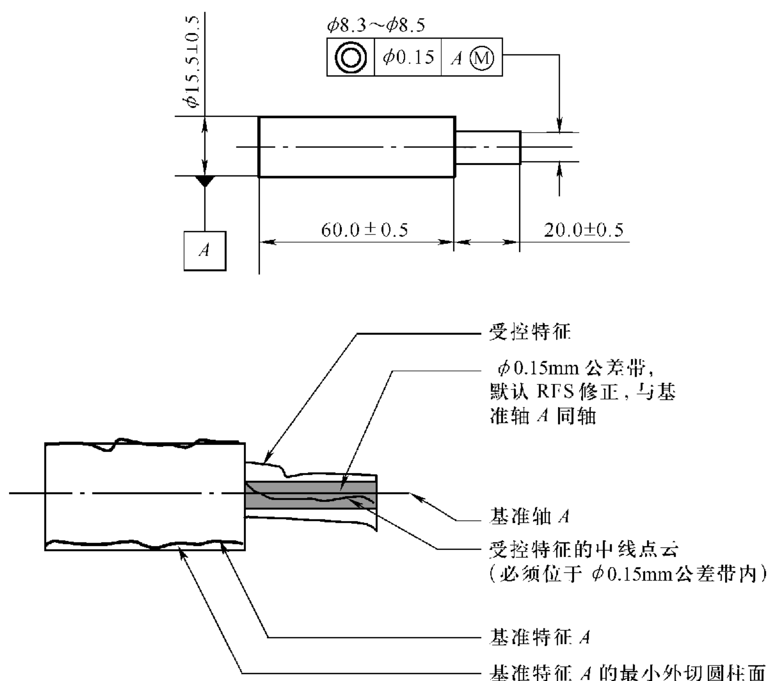


图 7-8　同心度的定义

由于同心度的概念和对称度相同（定义相对面上的点的对中性），且这两个控制同位置度有本质的区别，位置度定义受控特征的理想配合特征的轴线或中心面，所以这三个定位控制都应该保留。因为这些控制的差别，所以在被取消应用的 12 年后，在 1994 年的 ASME Y14. 5 重新引入同心度控制。

在图 7-9 中，每组两个相对点产生的中点形成的中心面点云必须位于规定的 0. 15mm 宽的对称度公差带内，这个平行面公差带垂直于基准特征面 *A*，等边分布于基准中心面 *B* 的两侧，每侧 0. 075mm。如果所有的点云上的点位于公差带内，那么就符合对称度的要求。这个公差带应用尺寸不相关原则（RFS），特征尺寸变化时，公差带不会变化（公差不会被 MMC 修正），也不可以使槽特征整体浮动（基准符号也不可以使用 MMC 修正）。

如果要设计一个该槽特征的匹配特征，就需要使用位置度来定义这个槽形特征。位置度允许使用 MMC、LMC 或 RFS 来修正，默认情况下是 RFS 修正。

有必要探讨一下对称度的测量。图 7-10 所示是对图 7-9 中零件的一种测量设置方式。图 7-10 所示的设置方式必须保证基准特征面 *B* 的平行度要求，才能保证后续测量的精确性。先要将零件的特征面 *A* 靠紧角板，满足主定位设置要求，然后将零件上 *B* 面的一个平行面与测量台面接触，使用高度尺记录下足够多的点。再将零件 180°翻转，保持 *A* 面靠紧角板，*B* 面接触测量台面，同样使用高度尺记录下上次测量的所有点的相对点的高度值。比较两组读数，然后可以分析是否满足规定的对称度要求。另一种比较好的设置方式是将基准 *B* 的两个面放在两个平行板之间，两个平行板与基准面 *B* 的高点接触，即平行板之间的间距最



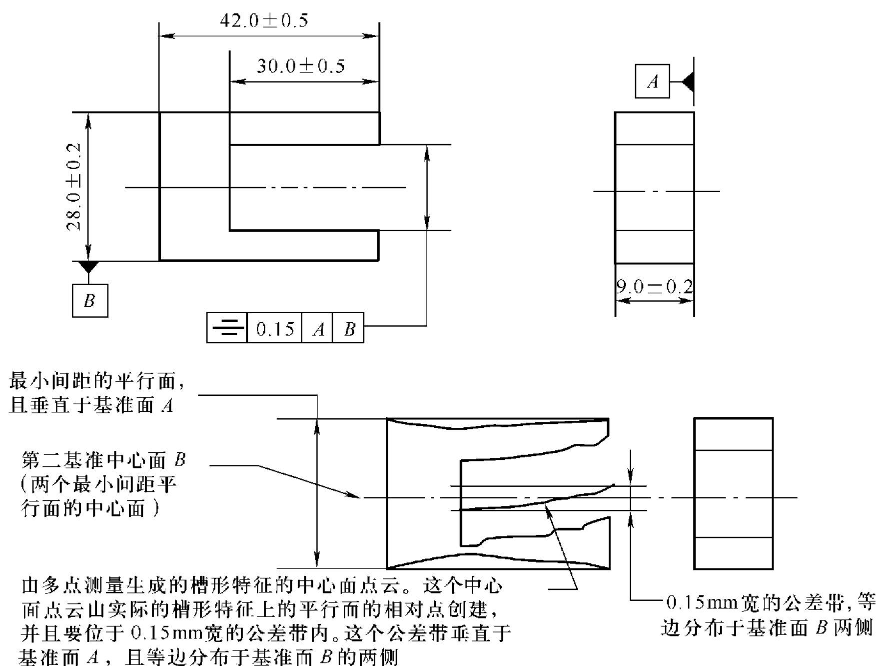


图 7-9　对称度的定义

小，然后求得基准特征 *B* 的基准中心面。

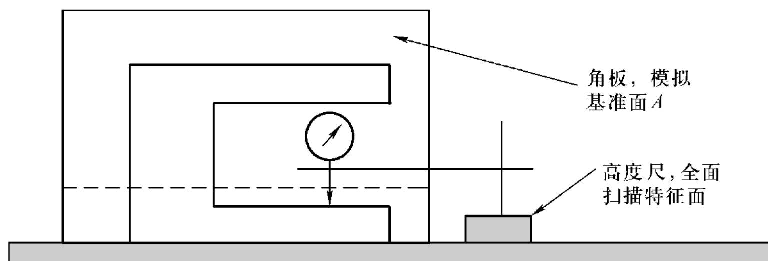


图 7-10　对称度的测量设置

第三节　位置度的定义、应用及检测方法

一、位置度的定义

位置度的应用目的就是满足装配功能，同时定义了特征装配中心的位置公差带和装配特征的配合边界。

位置度是一种应用最广泛的几何公差控制，能够影响零件的功能、互换性、可重复性和成本，以及阐明设计意图。位置度综合使用了设计基准、公称尺寸和公差控制符号来定义一个特征。

位置度能够定义约束中心点、轴线或中心面定位的公差带，也能够约束一个或多个面在

规定的公差带范围内，这个范围就是 LMC 或 MMC 修正下的实效边界（Virtual Border）。

二、位置度的应用

图 7-11 所示是一个定位四个孔的位置度控制应用。

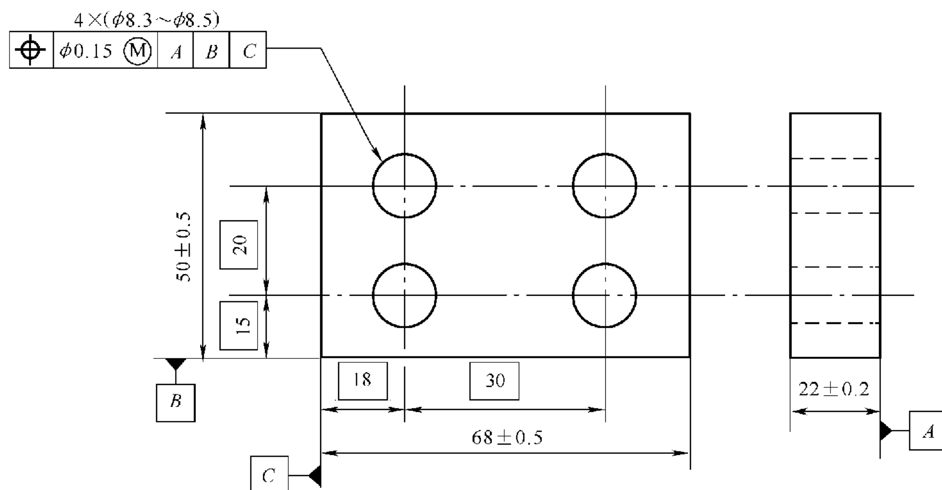


图 7-11　位置度的应用

图 7-11 中的关键控制如下：

1）为测量参考的基准参考框架的建立。基准特征 *A* 被指定为主定位基准，基准特征 *B* 被指定为次定位基准，基准特征 *C* 被指定为第三定位基准。这些基准特征微观上都有高点，这些高点可以用来在测量或加工过程中建立模拟基准。这三个基准特征建立起来的基准框架由三个依次相互垂直的面组成，先建立主定位面，然后次定位面垂直于主定位面建立，第三定位面垂直于主定位面再垂直于次定位面建立。

建立主定位面要确定至少三点接触主定位基准特征 *A*，如果基准特征 *A* 上的高点分布在中间位置，可以想象这个零件会产生晃动，进而导致定位面很低的可重复再现性问题。

当主定位面建立后，次定位面垂直于主定位面，并且次定位面要保证至少和次定位基准特征 *B* 至少两点接触。同样地，次定位面也可能不稳定，产生摇晃而导致的可重复性差问题。可以通过平面度或垂直度来减少这种问题。

第三定位面垂直于主定位面和次定位面，由第三定位基准特征 *C* 建立。保证主定位面与零件的基准特征 *A* 至少三点接触，次定位面与基准特征 *B* 至少两点接触，第三定位面与零件的基准特征 *C* 至少一点接触。至此，测量和检测零件的三个基准面建立完毕，可以开始下一步的尺寸定义。

2）起始于基准 *B* 和 *C* 的公称尺寸用来建立四个孔的理论轴线位置。这四个孔的轴线的公称尺寸没有公差，所以从基准到特征，特征到特征的尺寸链上没有公差累积效应。每一个孔都被定义了一个理想的位置。这个理想的位置是加工的目标位置。但是理想位置在现实中是不可能实现的，必须对这些理想位置建立公差带，这些公差带由公差控制框描述。



3）公差控制框包含以下必要的信息：

① 位置度公差符号。

② 公差带的形状描述或默认形状。图 7-11 中的公差带是一个圆柱面公差带。圆柱面公差带的轴线和孔的理想轴线重合。实际加工孔的匹配尺寸轴线必须位于这个公差带内。

③ 圆柱面公差带的直径为 ϕ0.15mm。

④ 公差控制框中使用了修正符号Ⓜ。这种情况下，当这四个孔的尺寸为最大实体尺寸 ϕ8.3mm 时，圆柱面公差带直径为 ϕ0.15mm。当实际加工孔的尺寸由 MMC 向 LMC 变化时，位置度公差带可以得到相应的补偿量。当孔的尺寸为 ϕ8.5mm（LMC）时，最多可以补偿 0.2mm 的公差，最终的位置度公差为 ϕ0.35mm。

三、浮动螺栓的装配

图 7-11 中的圆柱面公差带垂直于基准面 A，公称尺寸同基准 B 和 C 定义特征孔的位置，也是公差带的中心。

如果使用螺栓螺母将图 7-11 中的零件两件装配到一起。螺栓螺母开始并没有定向定位，直到将螺栓插入孔中，将螺母拧紧装配。

这种浮动形式的螺栓和孔板的装配公式如下：

$$T = E - F, \quad H = T + F, \quad F = H - T$$

式中　T——孔的位置度公差；

E——孔的 MMC；

F——螺栓的 MMC。

这些公式能够用来定义总成中孔的公差带，或者可以用来推算孔的 MMC 或螺栓的 MMC。$T = E - F$ 是计算给定的孔直径尺寸和螺栓的尺寸位置度公差的公式。如果两个孔板的孔的尺寸差异很大，则每个孔板的位置公差需要单独设定。

四、延伸公差带（固定螺栓或销的过盈装配）

为了模拟匹配零件的最大厚度或销轴的最大高度，公差带超出特征表面延伸于受控特征孔的控制方式叫作延伸公差。传统的位置度控制和垂直度控制不能满足螺纹孔或过盈配合的孔的定位。浮动螺栓的公式只适合计算螺纹孔的位置度。如果一部分的位置度公差用来作为垂直度的公差，那么螺栓有可能同匹配的零件在厚度上产生干涉。因此建议在所有的螺栓孔上使用延伸公差带。

螺栓的 MMC（配合入螺纹孔的部分）减去配合零件间隙孔（螺栓穿过这个孔将两个零件紧固到一起）的 MMC 的差分配到螺栓和间隙孔，这样完成螺栓和间隙孔的公差带。这个螺栓和间隙孔之间的公差分配可以各为 1/2，更加合理地分配原则是基于这两个特征的加工难度。加工难度大的特征应该分配到更多的公差值。同时也应该注意，由于螺纹孔的自对中性，抵消了位置度获得的补偿公差（但实际的内外螺纹的节圆配合存在间隙），因此应该考虑赋予螺纹孔更多的位置公差值。此外也应该考虑间隙孔上的尺寸公差可以被转变为间隙孔的位置度公差，换句话说就是 MMC 时赋予间隙孔的位置度公差可以缩小。

公差分配计算如图 7-12 所示，是一种比较常规的公差赋予方式。

但是这个位置度控制意味着孔的垂直度精度是微米级的，且孔垂直于基准面 A 的精度

也是微米级的。这将给加工带来困难，很难保证。为了改善设计，或者在合理范围内增大间隙孔的尺寸，可通过匹配零件的厚度计算增加螺纹孔的垂直度和位置度公差值，或者使用延伸公差。

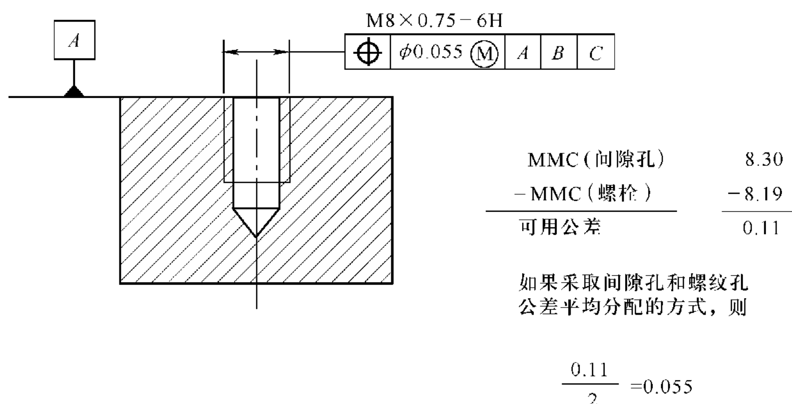


图 7-12　螺纹孔的位置度的定义及计算

五、螺纹孔的检测

检测螺纹孔轴线位置时，一种错误检测方式是：使用无螺纹的检具销插入内螺纹的小径测量。检具销通常用来定位面特征的位置。这种方式错在使用二维的信息判定一个三维的特征，并且测得的位置信息是内螺纹小径的轴线位置，而不是实际配合的节圆直径。

这中测量的公差带如果不只是延伸到装配面（例子中是 *A* 面）以上螺栓的高度，则不能完全确定是否能够确保安装。拧入螺栓孔的螺栓有可能偏斜过大，与配合零件产生干涉。

不考虑延伸公差的设计会导致不合格的螺纹孔通过检验。但是如果一个螺纹销拧入螺纹孔，检测螺纹销在延伸公差带长度的范围内的位置，就会避免这种情况发生。遵循零件必须按功能检验的原则，建议延伸公差带应用于螺纹孔的定义，或在那些需要过渡、过盈配合的孔的定义。

图 7-13 所示是一个比较常规的位置度公差具有延伸公差带要求的标注方式。

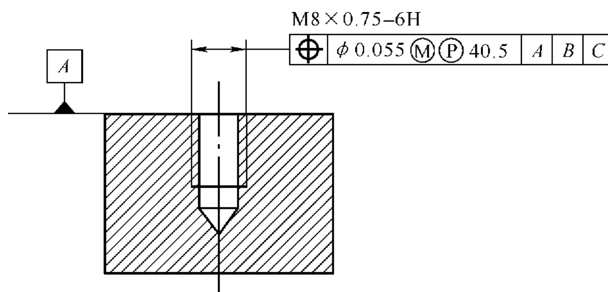


图 7-13　延伸公差

图 7-14 表明了螺栓要穿过一个 40.5mm 厚的配合件，最终拧紧在这个受控螺纹孔内。延伸公差带的高度是螺栓在螺纹孔装配面 *A* 以上的高度。不应该理解延伸高度为螺纹孔内



部和外部高度的和。在延伸公差规定中，所有的公差带都是螺纹孔配合面以上的部分。也可以在配合面上使用虚线的方式表明延伸公差带高度（见图7-14）。检测时使用功能检具销模拟配合零件的状态，确定特征轴线在规定的40.5mm的高度上（从基准面A）是否位于ϕ0.055mm的圆柱面公差带内（见图7-15）。

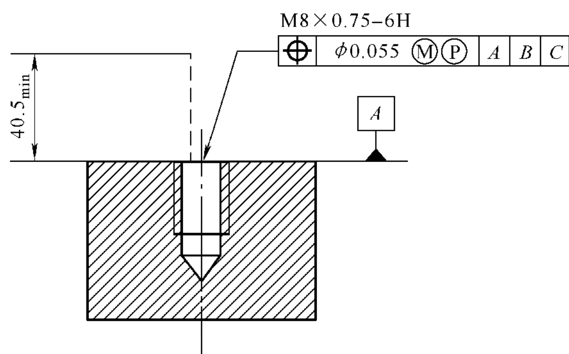


图7-14　延伸公差的定义

图7-16显示了螺栓在ϕ0.055mm螺纹孔位置圆柱面公差带内可能的三个轴线位置，分别在投影高度（即配合零件二的厚度）上产生的不同实效边界空间，所以只能控制螺纹孔的位置度，并不能直接控制零件是否干涉。

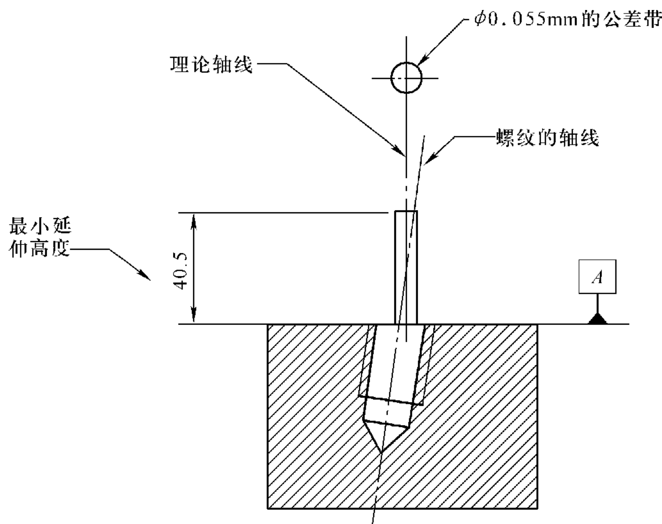


图7-15　延伸公差带

六、螺纹孔的实效边界

被MMC条件修正和有延伸公差带要求的内螺纹的位置度或垂直度的实效边界的计算同固定螺栓一样。其原理是在MMC条件的修正下，使用螺栓的MMC加上位置度或垂直度公差得到实效边界。这个计算也用于在RFS条件下的最差装配边界计算。

实效边界可以用来制造功能检具检测螺纹孔。这个功能检具可以是一个代表主定位面（即装配面）的面板，面板上有一个以实效边界尺寸为直径的孔。检具孔的轴线处于基准框架中的理论位置，将零件也放入（定位在）这个基准框架（检具支撑）中。如果与这个螺纹孔配合的螺栓能够通过检具上的孔，那么也能拧入实际的零件，并匹配不发生干涉，这个零件就是合格的。

那么是否应用RFS或MMC原则到螺纹孔上？当一个螺栓拧入螺纹孔，会有一定的倾

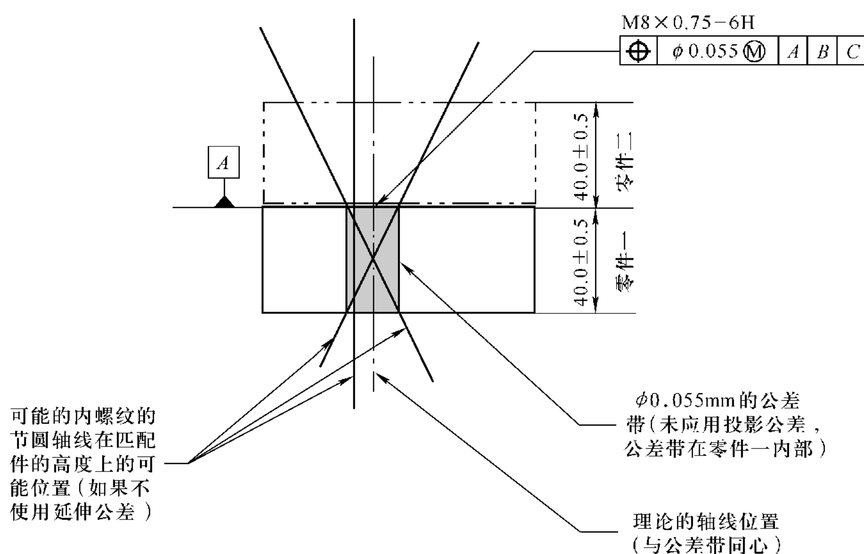


图7-16　螺纹孔的位置度定义公差带

斜。除了螺纹孔本身轴线的倾斜，这个螺栓和螺纹孔之间的倾斜部分是由于螺栓的节圆直径小于螺纹孔的节圆直径间的间隙导致的，倾斜的结果是使装配更容易。因此6级螺纹比5级或4级更容易装配，因为节圆间的间隙越大，装配就越容易。

如果允许这种倾斜，以便于完成装配，就应该允许一定的公差值。这就是MMC修正下的补偿公差。如果无法测量这个补偿公差，建议使用功能检具，这种方式会自动地适应任何量值的补偿公差。

如果设计者因为无法定量确切的补偿量而不希望使用补偿公差，那么就应用RFS原则，在测量过程中忽略补偿的问题。但是不推荐这样的应用，因为RFS原则意味着螺纹孔尺寸正好是螺栓的尺寸，这种情况几乎没有。为了实现装配，内外螺纹间的节圆直径永远存在间隙。使用MMC修正其实是体现了实际的装配情况。

在装配螺栓到螺纹孔的过程中，不要认为这种可以倾斜一点的装配是公差带增大的结果（当节圆直径增大），而看作是一种增加螺栓在延伸公差带内更多地完成装配的方法。在检测时，螺纹销正是利用了这个好处，很小的额外的公差可以被检测销探测出来。一个公差控制框只是一个符号在标准语法规则上的一段话，如果没有在几何公差控制中说清实际零件的功能和设计意图，那么就可能都导致合格的零件被拒收，或不合格的零件被通过的情况。

浮动和固定螺栓的装配条件计算是很重要的。这些公式赋予了零件合理的尺寸和公差，创建了配合零件的最差匹配条件，使配合零件满足装配要求。

如在浮动螺栓装配中，公式中的间隙孔的MMC和螺栓的MMC相减计算孔的位置度公差目的是创建一个MMC条件下的实效边界，所有等于或大于孔的MMC的螺栓可以配合入这个孔。这个实效边界贯穿两个孔板的厚度，对于所有的孔阵或任何数量的孔都有效。影响零件是否能够装配于总成中的决定因素是每个孔板的螺栓配合孔的MMC条件下的实效边界都满足要求。

对于固定螺栓，原理相同。如果最差匹配条件满足装配（一些会在延伸公差带的修正



下)，那么零件就会装配于总成中。

七、过盈、过渡配合中的延伸公差

过盈、过渡配合孔上的延伸公差控制是为了确保一旦销轴被插入孔中，不会有太大的倾斜，而与匹配件干涉，或者说无法同匹配零件装配在一起。这种配合，虽然要求销轴要和一个零件的孔紧配合，但是对于配合零件的配合状态不做要求，也就是说可以是不同于销轴和第一个零件的紧配合，可以是间隙配合。

检测中，除了使用功能检具检测螺纹孔的位置，也需要使用一端有螺纹（螺纹长度等于螺纹孔的螺纹深度）的检具销（光面长度为延伸公差要求的长度）来验证。螺纹检具销的螺纹一端要全长地拧入受控螺纹孔，把零件设置在公差控制框中定义的基准框架中。检测延伸公差长度的检具销的轴线位置，也就是螺纹孔节圆的轴线是否超出了规定的位置度公差带范围。

图 7-17 建立的基准参考框架定义了一个螺纹孔的位置和定向。基准参考框架使用了一个共面来建立主定位面 *A*，让两个侧面分别建立为基准面 *B* 和 *C*。延伸公差带延伸于 *C* 形件的内部表面向外，主定位面是用来定向这个延伸公差带的。螺纹孔的中心轴线上相对于基准 *B* 和 *C* 的尺寸链用来定位延伸公差带和定向定长延伸公差带。这个延伸公差带垂直定向于基准面 *A*，起始于零件内表面，最小高度为 40mm。

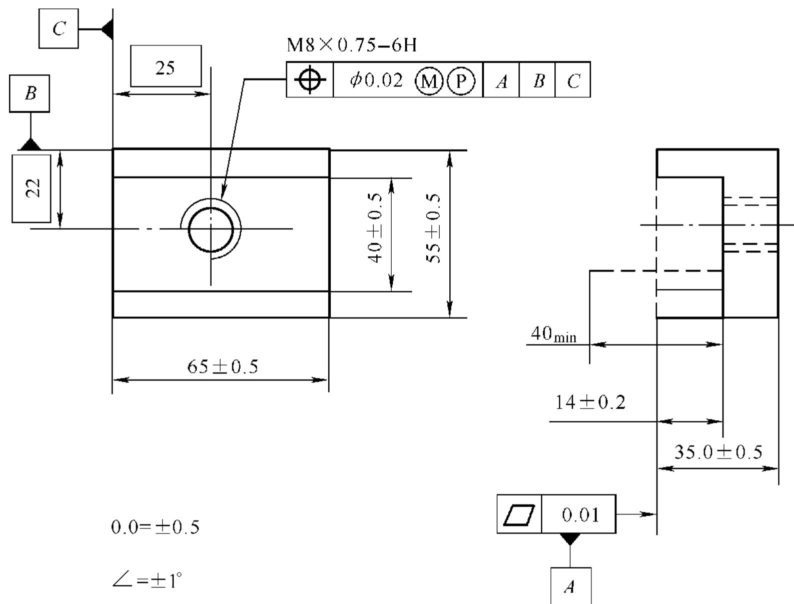


图 7-17　延伸公差定义实例

前面提到的螺纹孔符合圆柱面延伸公差带指的螺纹孔的轴线是节圆圆柱面的轴线。所有的延伸公差带都处于零件外部。受控螺纹孔的节圆圆柱面轴线必须在 40mm 的高度上位于延伸公差带 ϕ0. 02mm 内。也就是说在 40mm 之外的区域，对于节圆的轴线没有要求。推荐使用螺纹检具销模拟受控螺纹孔的节圆轴线，在超出零件 40mm 的表面上检测是否符合公差定义。

在图 7-18 中，受控特征定位于基准 *A*，基准 *A* 被 MMC 条件修正。特征控制框说明：当受控特征被加工的尺寸为 ϕ15.5mm（MMC）时，它的轴线必须位于 ϕ0.00mm 的圆柱面公差带内，公差带的轴线为基准特征 *A* 形成的轴线，且基准特征 *A* 的模拟尺寸为 MMC（ϕ35.2mm）。这个例子不需要公称尺寸定义理论的受控特征的位置。这个特征的轴线理论上的位置同轴于 MMC 时的基准轴线 *A*。

实际上不可能实现基准特征 *A* 被加工为 MMC（ϕ35.2mm）。因此，受控特征的理论位置实际也是无法实现的。理论位置可以在检具中模拟，实现功能检具对于同轴关系的检验。检具是无法实现理想状态的检验的，是对受控特征和基准特征之间的同轴关系的模拟。一个实际零件装配到功能检具中（两个同轴孔，一个是 ϕ15.5mm，一个是 ϕ35.2mm），理论的轴线位置模拟在检具的中心，如图 7-19 所示。

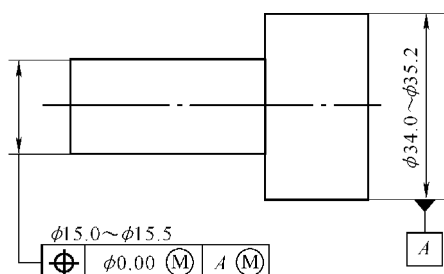


图 7-18　位置度公差控制的台阶零件

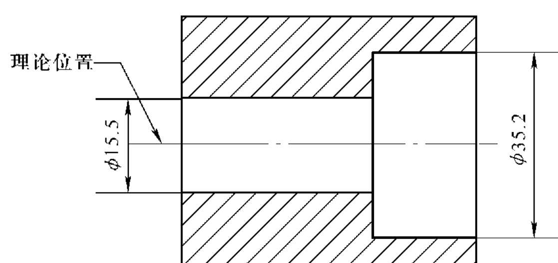


图 7-19　阶梯轴零件的检具（理论尺寸）

图 7-18 所示零件的两个特征任何一个实际加工尺寸为 MMC（假设），而另一个不是 MMC，被加工为 MMC 的特征可以被认为处于轴线的理论位置。这意味着，如果受控特征的尺寸为 ϕ15.5mm，而基准特征 *A* 的直径例如为 ϕ34.0mm，那么受控特征处于理论位置，基准特征的轴线偏离。同样的逻辑，如果基准特征 *A* 的加工尺寸为 ϕ35.2mm（假设），受控特征尺寸小于 MMC，那么基准特征 *A* 处于理论位置。反映到图 7-19 所示的检具上，理论位置就是检具的中心线，如果任何特征被加工为 MMC，那么这个特征的中心线与检具的轴线重合，处于理论位置。

如果基准特征和受控特征都被加工为 MMC，两个轴线的同轴度公差为 0。如果其中一个特征偏离 MMC（在尺寸范围内），那么就可以得到相应的同轴度公差。偏差的量等于两个特征偏离 MMC 的综合量。例如，如果受控特征的实际加工尺寸为 ϕ15.2mm，或者说偏离 MMC0.3mm，那么两个特征间的轴线允许的误差为 ϕ0.3mm。

这种当基准特征和 MMC 之间的偏差等量补偿只会在零件比较简单的情况下发生。对于不止一个控制基准的非同轴的复杂特征或多个特征的情况，当基准特征或尺寸特征偏离 MMC 时，受控特征阵列的浮动很难计算，不会像图 7-18 中的一对一的零件那样容易计算。这些阵列会作为一个整体浮动，如果受控特征因为基准特征的 MMC 允许的偏差，整个特征的阵列必须一致地在一个方向以相同的量浮动。

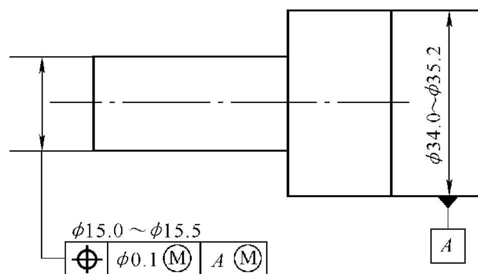


图 7-20　MMC 修正的位置度控制

如图 7-20 所示，如果受控特征尺寸从 MMC



变化到 LMC，与基准轴线 A 同轴的位置度公差带也从 $\phi0.1$mm 变化到 $\phi0.6$mm。如果基准特征的尺寸为 MMC（$\phi35.2$mm），那么可以确定基准特征轴线和基准轴线在空间上处于同一位置。这个例子中，受控特征轴线可以得到的最大公差带是 $\phi0.6$mm，如图 7-21 所示。

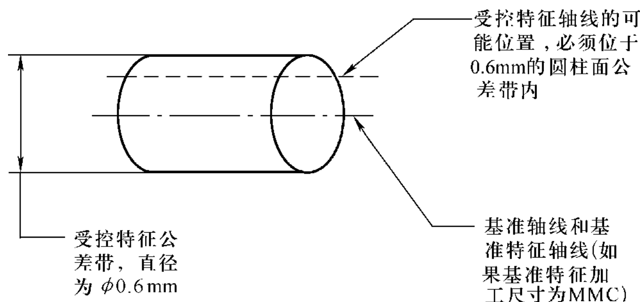


图 7-21　MMC 修正的位置度控制的公差带

如果基准特征被加工成小于 MMC，基准特征的轴线可以获得一个公差带，基准轴线便可以在其中浮动。如图 7-22 所示，如果基准特征的加工尺寸为 LMC（$\phi34.0$mm），浮动公差带的最大直径为 $\phi1.2$mm。

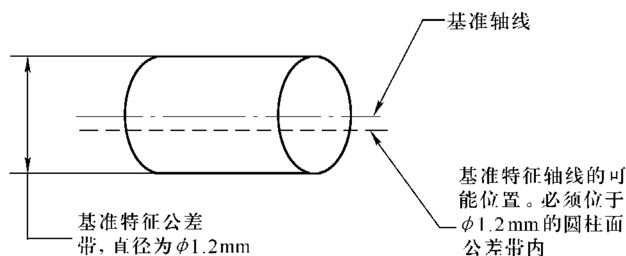


图 7-22　位置度公差带

图 7-23 中描述了以基准轴线为中心线的两个公差带。如果特征尺寸为最小实体尺寸（LMC），那么相应特征的公差带的尺寸最大。受控特征的轴线位于 $\phi0.6$mm 的圆柱面公差

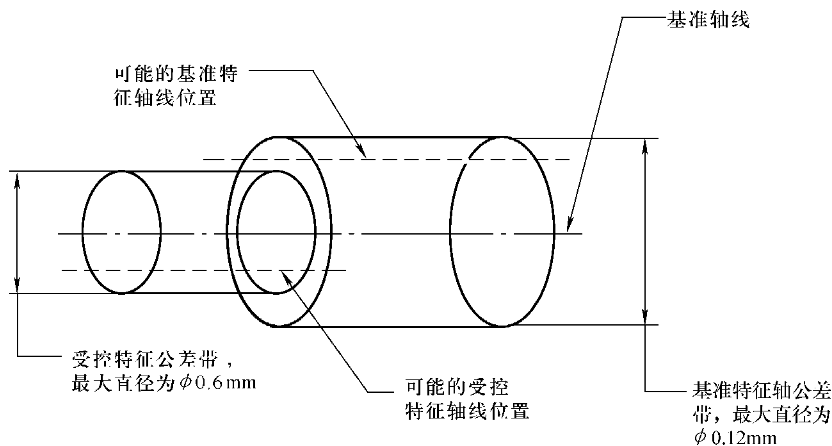


图 7-23　位置度公差带的描述

带内（径向0.3mm距离于基准轴线）。基准特征轴线位于ϕ1.2mm的圆柱面公差带内（径向0.6mm距离于基准轴线）。如果是以上条件（特征尺寸都是LMC），那么基准轴线和受控特征轴线的最远偏差距离可以是0.9mm。

八、位置度、同心度（同轴度）和跳动控制的比较

1. 位置度

位置度是轴线对基准轴线的控制，在位置度实现同轴度约束中最宽松。因为位置度是同轴度约束中唯一允许使用MMC和LMC修正的公差控制，这样产生了一个补偿几何公差。应该注意的是，使用MMC修正能够导致生产成本降低。位置度公差控制适用于那些装配中不需要质量的分布控制的约束中。

当MMC修正公差控制框中的尺寸基准特征允许应用补偿公差，轴和孔的装配中的间隙变得更加不均匀。零件可以通过检验，但是很有可能是偏心的装配。这对于那些旋转零件会有负面的效应（振动或噪声）。所以MMC修正的几何公差控制框只适用于那些非旋转零件。位置度公差不对特征形状约束。在同轴度约束中，位置度控制受控匹配轴线和基准特征轴线之间的位置关系。

2. 同心度（同轴度）

同心度是对于拟合中心线和基准轴线间关系的控制，在公差控制框中，不能使用MMC或LMC修正。所以同心度控制中没有补偿公差可以应用。因此同心度是一个非常理想的旋转零件控制方法。对于加工来说，同心度控制因为对特征面的轮廓没有要求，所以比跳动控制更容易加工。可以使用FIM测量评估同心度，FIM评估不合格的零件可能满足同心度的要求，这点需要注意。

因为同心度控制对于特征面没有圆度要求，而FIM输出同时验证了同心度和圆度约束，所以在特征直径被声明合格之前，FIM的圆度输出应该从读数中过滤掉。也是因为如此，同心度被很多人认为检测困难。确实，对于FIM检测方式，如果特征面圆度超出范围，会导致圆度的测量困难。对于非圆特征面的同心度，通常的程序是量取特征面上180°相对点的值来验证这些直径方向上的相对点的中点是否在同心度的公差带范围内。这个公差带是一个圆柱面且同轴于基准轴线。虽然很多人提倡使用跳动替代同心度，但是跳动控制要求更严格，因为跳动复合约束了一个特征的圆度和同心度。

因为跳动的几何约束更严格，很多人会认为加工跳动约束的特征比加工同心度的成本会更高。事实上是，跳动更容易检验，而同心度总的来说更难控制。这就需要设计者来平衡选择，一个零件的圆度是否是必须要求约束的，如果不是，那么是强调加工（同心度优先）还是强调检测（跳动优先）。事实的操作是，对于一个现成的零件，如果毛坯料不强调圆度，那么同心度控制是足够的。对于待维修的零件，如果同心度满足，也可以应用同心度，从而避免再加工的成本。

3. 圆跳动

跳动用来约束一个面与一个轴之间的关系。圆跳动的公差控制框中也不能应用MMC或LMC修正，不能从尺寸公差获得补偿公差。跳动也是一个理想的旋转零件约束方式。检测方式对于受控面上每一个独立的圆元素做360°FIM读数输出。

如以前所提到的，因为跳动控制复合约束了受控特征的圆度和同心度，所以常常被认为



比同心度更容易检测。圆度约束的特征面的圆线元素都应该在各自规定的公差带范围内。这个可以由各个圆线元素的 FIM 读数和圆跳动的公差控制框中的公差值直接对比评估。虽然圆跳动中的圆度约束使跳动的检验更加容易，但是圆度约束也造成了加工的困难。在选择跳动控制定义一个特征之前，要先确定是否同时需要圆度（形状）控制和同心度控制。或者单单是为了一道额外的加工程序获得足够的圆度以利于检测的目的。

当做 FIM 输出时，要注意每一个圆线元素的测量前都要复位测量设备，以保证这些断面上的圆线元素都能对基准轴线做完全独立的测量评估。

4. 全跳动

全跳动是对于一个面的整体相对于一个基准轴线的约束。全跳动公差控制框中不能使用 MMC 或 LMC 修正，所以没有补偿公差应用。全跳动是最理想的旋转特征的平衡控制。检测时，探针对于一个连续的旋转体表面在纬线方向上滑动测量。所有面元素的 FIM 输出读数必须同时位于特征控制框规定的公差带范围之内。

全跳动控制圆柱度（形状：圆度、直线度和锥度）和同心度（位置），所以全跳动被认为比圆跳动加工更加困难。对于检测，全跳动通常需要计算机辅助，并且要存储更多的数据（对设备有一定的要求）。

九、同轴（轴线重合）控制总结

位置度是轴对于基准的控制。因为允许 MMC 或 LMC 控制，允许的补偿公差导致了装配间隙的不均匀，所以同轴度约束最宽松，成本优势最好，应用于非旋转零件。

同心度是拟合中心线对于基准轴线的控制，不能被 MMC 或 LMC 修正，可以应用于旋转零件的平衡控制，比圆跳动控制加工容易，可使用 FIM 检测判断合格零件，但不能作为拒收零件的依据。因为不对圆度约束，因此同心度需要不同的测量方式，测量困难。

圆跳动是面对于基准轴线的控制，不能被 MMC 或 LMC 修正，无补偿公差，同时控制圆度（形状）和同心度（位置），可应用于旋转零件的平衡控制。相对于同心度，圆跳动的检测更容易实现。但是因为附加的圆度约束，圆跳动控制加工更困难，成本更高。圆跳动控制可以使用 FIM 评估，但要求每个圆线元素独立测量。

全跳动是面对于基准轴线的控制，不能被 MMC 或 LMC 修正，无补偿公差，同时控制圆柱度（圆度、直线度和锥度）和同心度。全跳动是成本最高、控制最严格的同轴度控制，有最好的旋转零件的平衡控制。全跳动比圆跳动的加工、检测更难，但是比同心度的检测容易。全跳动控制可以使用 FIM 评估，测量时探针在连续的旋转特征面纬线方向上滑动，同时零件做 360°旋转。

十、MMC 时的零公差约束

MMC 时的零公差约束可以在不影响功能的情况下增加零件通过检验的合格率。一个设计或检验的原则是，如果零件能够满足装配要求和在总成中能实现功能，那么就应该判定这个零件合格。

实际操作中，很多零件因为不符合尺寸要求而被报废或维修。这些零件中常常存在这种情况：在 MMC 约束的实效尺寸范围内，不影响零件的强度，并且可以实现装配、满足功能要求。MMC 时零公差约束允许更多的尺寸公差，却没有改变特征实效尺寸边界。随着公差

范围的扩大，进而允许加工者可以选择更多的刀具来完成作业。

传统的 MMC 修正的几何公差控制转换为 MMC 时零公差的修正非常简单，如图 7-24 所示的孔的公差控制框。

对于一个孔的 MMC 时零公差的转换程序是：MMC 减位置度公差作为新的 MMC（图 7-24中为 14.3 − 0.1 = 14.2），位置度公差同时变为零，LMC 保持不变，如图 7-25 所示。

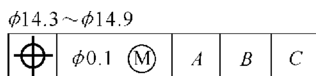


图 7-24　位置度公差控制框

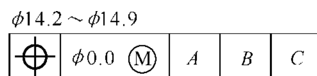


图 7-25　孔的零位置度公差控制的转换

图 7-26 所示为一个轴的零公差转换。转换程序是：MMC 加上位置度公差（图 7-26 中为 18.9 + 0.1 = 19.0），位置度公差同时变为零，LMC 保持不变，如图 7-27 所示。

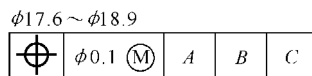


图 7-26　轴的公差控制框

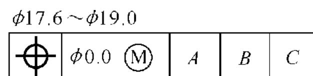


图 7-27　轴的零位置度公差控制的转换

当 MMC 变化时，位置度公差同时变化，但其他保持相同。实效尺寸边界转换前后保持相同，LMC 也保持不变。

零公差转换不适用于螺纹孔。因为螺纹孔具有自对中性，螺纹尺寸不可以简单用来补偿尺寸公差。零尺寸公差也增加了零件的质量，所以对于一些对质量敏感的零件不适宜使用。如果使用 RFS 修正，也不能使用零公差转换。因为如果在 RFS 修正下的零位置度公差，无论尺寸如何变化，受控特征必须被加工在理想位置，现实中是不可能实现的。

对于 LMC 修正的公差控制，零公差转换也是适用的。其目的通常是扩展尺寸公差，获得更大的合格率。零位置度公差非常具有实际意义，这个转换没有破坏设计者定义的功能边界，接受更多的可以使用的零件。一个特征如果被加工的尺寸和 MMC 的偏差越大（不能超出 LMC 边界），那么这个特征获得的位置度公差补偿越多。零位置度公差的目的就是尽可能地将尺寸公差转换为位置度公差。

图 7-28 所示是一个传统的轴的位置度控制。

如果图 7-28 中轴的实际位置度公差为 ϕ0.2mm，轴的实际加工尺寸是 ϕ18.9mm，这个零件就必须拒收，因为超出了 MMC（ϕ18.7mm）的约束范围。但实际上可以算出这个零件不影响装配，这个零件的实际匹配边界是 ϕ19.1mm，这个零件的设计实效边界尺寸是 ϕ19.7mm，所以能够满足装配。零位置度公差转换后的公差控制框如图 7-29 所示。

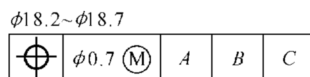


图 7-28　轴的位置度控制

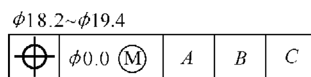


图 7-29　轴的零位置度公差控制的转换

从这个例子可以看出，直径为 ϕ18.9mm、位置度公差为 ϕ0.2mm 的轴是可以接受的。一个重要的因素是，实效边界 ϕ19.4mm 没有变化。

这种零公差的转换可以应用到所有 MMC 或 LMC 修正的公差控制中。这种转换的目的是



控制图样的更改和理解初始设计意图。但零位置度公差不能使用在质量敏感的情况。因为在提取轴的公差控制框中的公差增加到最大实体材料上，或从一个孔的最大实体材料减去公差时，都是在创建一个更重的零件，必须考虑这个额外增加的质量是否会影响零件的功能。

十一、零位置度公差的应用范围

MMC 修正时的零位置度公差不适合应用在过渡配合或过盈配合中。对于浮动零件（如销或轴），没有自己的位置度公差，其相对的匹配特征对于定位基准的位置度控制也不会太重要。

MMC 或 LMC 修正时的几何公差的零公差很容易判断是否合适。如对于一个同轴的零件需要旋转的时候，通常不会使用 MMC 或 LMC 控制，因为当特征偏离 MMC 时，零件的质量分布必然不均匀。并且由于自对中性，在螺纹孔或锥形沉孔的情况下也不适用零位置度公差。并且这些情况中的公差补偿量计算很复杂。

然而，如果设计者关心的是匹配特征能够在总成中装配到一起，当尺寸定义和基准指定适当时，零位置度公差是最好的定义方式，能够将零件的合格率提高到最多。这意味着，在零件的验证过程中，更注重零件的功能（装配功能），而不是单单的尺寸约束。

下面讨论图 7-30 所示轴的位置度定义。

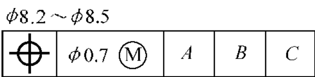


图 7-30　轴的位置度定义

如果只考虑这个轴的装配（相对于基准的定向和定位控制），这个轴和一个定位轴的同样的基准框架定位的孔配合。这个定义会导致许多能够满足装配的零件被拒收。这个零件的最差匹配条件（实效边界）是 MMC 加上受控特征在 MMC 时的几何公差，为 $\phi9.2$mm（$8.5+0.7=9.2$）。所以这个孔理论上能够接收那些实效边界小于或等于 $\phi9.2$mm 的所有轴。

十二、零公差的应用

表 7-1 是三个实际加工后的轴的直径尺寸。

表 7-1　轴的公差计算　　（单位：mm）

	实际的直径（匹配特征尺寸，不考虑位置、定向）	轴轴线的位置度公差	实际的最差匹配条件
零件 A	$\phi8.6$	$\phi0.5$	$\phi9.1$
零件 B	$\phi8.7$	$\phi0.3$	$\phi9.0$
零件 C	$\phi8.8$	$\phi0.1$	$\phi8.9$

检测完这些零件后，在定义的基准框中，这三个零件都能匹配进总成中的孔，匹配孔的最差匹配边界也是 $\phi9.2$mm。加工中偏差最大的是 $\phi9.1$mm，最小的是 $\phi8.9$mm。所以轴可以匹配到设计的匹配孔中，这三个零件都能满足装配要求。

但是这三个零件都会被拒收，因为它们的直径都超过了 MMC（$\phi8.5$mm），为不合格的零件。设计者的意图并不是依据 MMC 而拒收能够满足装配的零件，如何避免这种情况呢？请参考图 7-31 所示的转换。

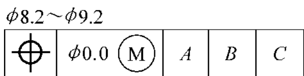


图 7-31　轴的零位置度公差控制的转换

如果使用图 7-31 所示的公差定义，那么这三个能满足实际装配的轴都可以接收为合格零件，尺寸公差约束也能够满足。实效边界仍然保持为 ϕ9.2mm，即配合边界没有变化，LMC 也保持不变。零件的强度事实上是增加了，因为此时是增加质量，而不是减少质量。只有 MMC 发生了变化。

实际加工的零件和 MMC 偏差多少，位置度就可以获得相应量的补偿。例如，一个轴 MMC 时位置度公差为零，那么如果这个轴的实际加工尺寸是 ϕ8.5mm，则它的位置度公差最多为 ϕ0.7mm。如果是一个孔的 MMC 时位置度公差为零，根据经验，加工者可以由更多的钻头可供选择。MMC 时零公差的目的就是在满足能够装配的前提下，可以接收更多的零件。

实际上没有一个公差控制工具能够在任何情况下适用。通过逻辑的判断、经验的累积和适当地使用，零公差是非常有效的设计工具。

十三、位置公差控制的过盈配合

销钉孔的配合可以使用延伸公差的方式定义，但是如果销钉要连接两个以上的零件，一个零件上的孔的过盈配合和同轴于相对应的另一个零件上的孔是很重要的。但是零件上的孔相对于零件的定位却不需要那么严格。

如果不使用延伸公差，最简明的方式是在总成中显示孔的定义。在几个零件组装的状态下，匹配特征可以被一个可以是很宽松的位置度公差框约束在一个非常严的尺寸公差内。这种情况下，MMC 是一个比较合理的公差修正，当尺寸偏离于 MMC 时可以补偿位置度公差，RFS 条件不能获得公差补偿。LMC 和 MMC 之间的区别很小。因为考虑的是销孔的同轴控制，而非孔在零件上的位置，所以 MMC 修正比较合理。但是如果在总成中定义孔公差时，要标明“配钻”的声明。

如图 7-32 所示，如果标明两个零件的孔配钻，那么加工者可以更容易地控制孔的同轴度。通常第一个零件的销孔要求过盈配合，而第二个零件为间隙配合。如果不是配钻的加工方式，那么第一个零件非常适合使用延伸公差，同时实效边界必须同时考虑，以便保证第二个零件的装配。

十四、组合公差

一个阵列特征定义需要整个阵列对于基准的定位和阵列内特征间的定位，如果想对阵列内特征间的定位进行比基准到全阵列默认的公差更严，那么就需要组合公差框。

图 7-33 所示是一个有四孔阵的孔板，使用组合公差框定位。四个孔的理论位置使用公称尺寸定义。这个公差控制框只使用一个位置度符号。第一行公差框定义特征阵列和基准之间的关系，当孔在最大实体特征尺寸时公差带为圆柱面 ϕ0.5mm；第二列公差框定义阵列内特征间的关系，当孔在最大实体尺寸时公差带为圆柱面 ϕ0.2mm。两组公差带都可以得到尺寸公差的补偿。

因为 MMC 修正，第一行的圆柱面公差带 ϕ0.5mm 可以有 ϕ0.5mm 的公差补偿，这个 ϕ0.5mm 的补偿公差来自于每一个孔的尺寸公差。所以每一个孔的轴线所位于的 ϕ0.5mm 的公差带（同轴于理论位置），可以增大到 ϕ1.0mm（当孔的尺寸为 ϕ15.7mm 时）。三个相互垂直的特征面被用来定位孔，它们是基准面 A、B 和 C。这三个基准面建立了一个基准框架，



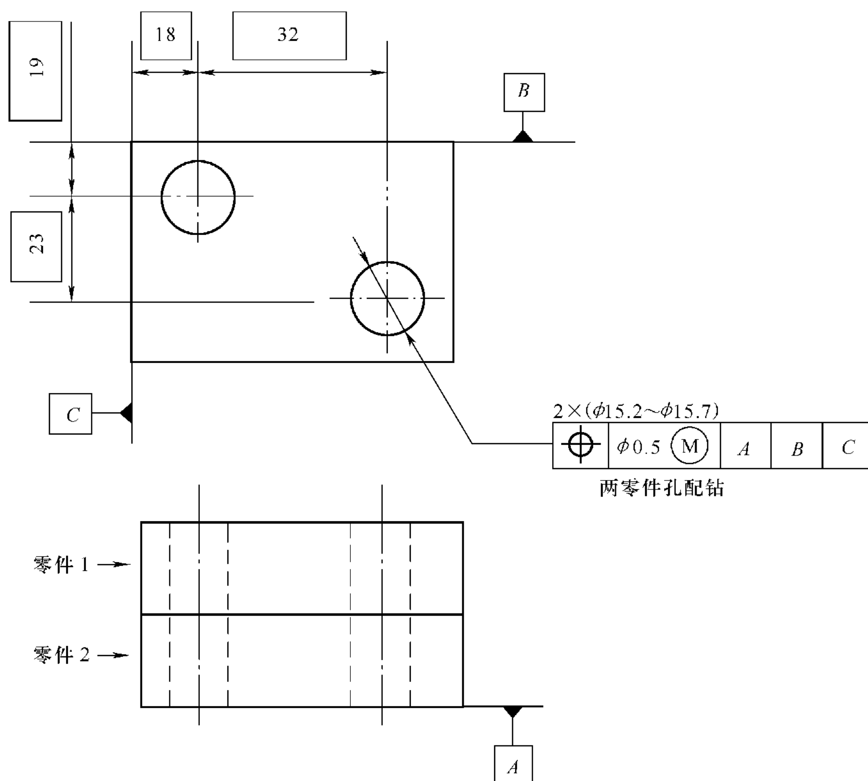


图 7-32　位置度与配合设计

阵列（四个孔）到基准的公差带（孔为 MMC 时为 ϕ0. 5mm）是静态的，轴线位于固定的理论位置。即使公差带的大小会发生变化，但是每个孔的公差带轴线位置不变。

第二行公差控制框是阵列内特征到特征之间的关系，孔之间的位置度被精确到 ϕ0. 2mm 的圆柱面公差带之内（当孔的尺寸为 MMC，ϕ15. 2mm）。也就是说孔之间的公称尺寸是 32mm 和 23mm，公差是 ϕ0. 2mm。第二行的公差框只重复了第一行公差框的主基准 *A* 定位。虽然没有建立一个完整的基准框架，但是约束了每一个孔相对于基准面 *A* 的位置度在 MMC（ϕ15. 2mm）时，公差带为 ϕ0. 2mm，比第一组公差框的公差带更窄。如果任何一个孔的直径为 LMC（ϕ15. 7mm），这个公差带可以最大增大到 ϕ0. 7mm。

基准对于特征阵列的关系中，如果四个特征孔中任何一个实际加工尺寸是 ϕ15. 3mm，那么这个特征的两个公差带（分别起始于 ϕ0. 5mm 和 ϕ0. 2mm）也都获得一个 ϕ0. 1mm 的公差补偿。如果任何特征孔实际加工尺寸为 ϕ15. 4mm，那么这个特征孔的两个公差带增大 ϕ0. 2mm。如果为 ϕ15. 5mm，那么两个公差带都增加 ϕ0. 3mm。当为 LMC 时，可以得到一个最大的补偿公差 ϕ0. 5mm。

阵列特征内孔 – 孔的位置关系不同于阵列 – 基准的关系（固定的），是可以浮动的。其原则如下（轴类零件也适用）：

1）公差带以公称尺寸定义孔之间的理论位置，作为一个整体浮动。

2）这个例子的孔的公差带理论位置：角度为 90°，距离为 32mm 和 23mm。

3）这些公差带都是圆柱面，定位于理论上的位置，垂直于基准面 *A*。

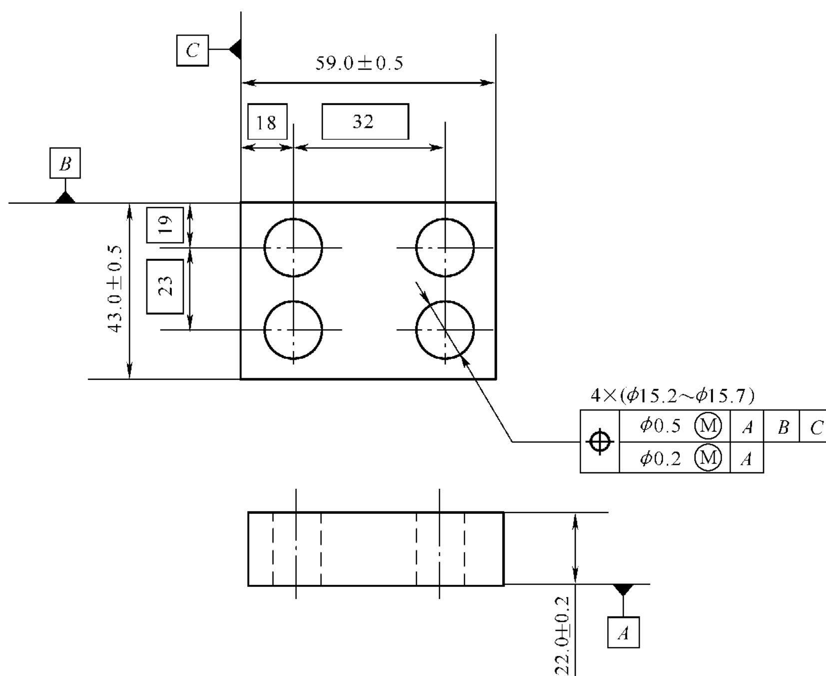


图 7-33　一个零件的位置度定义（组合公差控制框）

4）虽然这些公差带可以浮动，但是只能在阵列 – 基准的公差带内浮动，不能超出。也就是说，每一个特征孔的实际加工轴线位置既要位于特征 – 特征间的公差带，也要位于阵列 – 基准间的公差带。

如果基准特征符号加入到第二行的公差框内，仅仅增加了特征到基准的定向约束。应注意的是，第二行的公差框只是约束特征间的关系（这个例子是孔和孔之间的约束）。增加基准的效果就是使整个阵列相对于这个基准定向浮动（平行、垂直或倾斜度）。

十五、组合公差控制框的配合公差

为一个内部或外部特征的阵列设计匹配零件时，通常使用位置度控制。一个位置度公差控制框可以定义一个特征的实效边界。为了达到配合的目的，每一个特征都应该有一个定义的实效边界。

例如，将阵列特征更进一步地约束到一个更严的垂直度公差带内，如图 7-34 所示。

图 7-34 所示的匹配零件也应该应用这个公差控制框定义的相同的位置度的实效边界。其原因是没有公称尺寸和垂直度定义的公差带有关联。这些垂直度定义的公差带相互独立，它们可以在位置度定义的更宽泛的公差带内自由浮动。所以匹配零件的设计必须能够保证这些浮动的垂直度公差带能够浮动到位置度定义的公差带内的任何位置。一个主要的因素就是这个公差控制中位置度控制的公差带是唯一有公称尺寸定位的公差。

图 7-35 所示也是一个组合公差的例子。匹配零件的设计要考虑第一组公差的位置度实效边界，也要考虑第二组公差框的位置度实效边界。其原因是阵列中的特征间的公差带（第二组公差框）可以浮动在其相应的更宽泛的阵列与基准间的公差内（第一组公差框），



第一组公差框的公差带又被基准尺寸定义位置。这样可以允许使用约束的实效边界设计匹配零件。如果这个组合公差框定义的是一个具有四个销钉的腔体零件（见图 7-36 中零件一），则与其配合的是一个方形且具有四个孔的板（见图 7-36 中零件二）。

⌖	ϕ0.7Ⓜ	*A*	*B*	*C*
⊥	ϕ0.3Ⓜ	*A*		

图 7-34　独立组合公差框

⌖	ϕ0.7Ⓜ	*A*	*B*	*C*
	ϕ0.3Ⓜ	*A*	*B*	

图 7-35　组合公差框

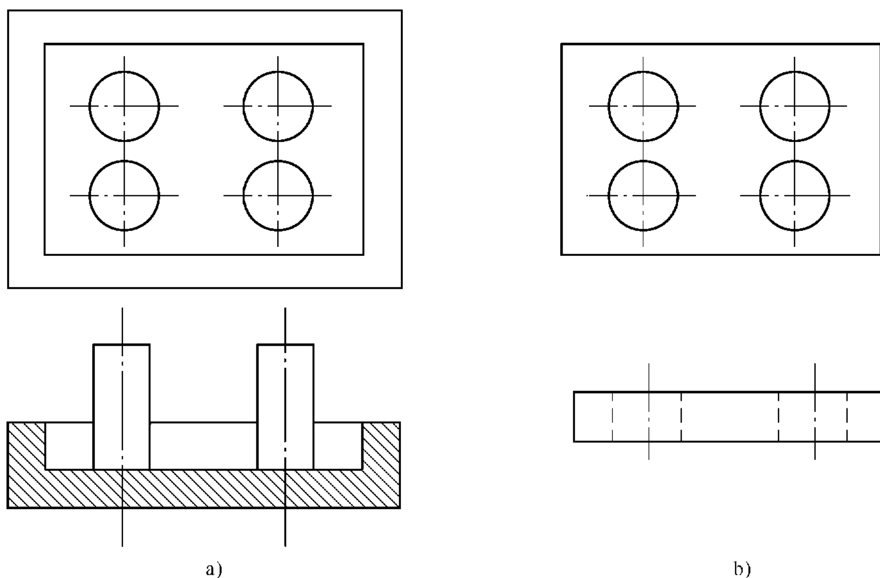


图 7-36　腔体零件与配合板件

a）零件一　b）零件二

如果使用第一组公差框中的阵列－基准的宽泛实效边界用来作为匹配特征的设计（第二组公差框如果采用两个以上的基准，基准顺序应该和第一组的基准顺序相同，公称尺寸的参考也相同），两个零件的最大实体尺寸应该是相同的。同时也应定义两个零件的垂直度，以保证在 MMC 时两个零件的定向对齐，以保证装配。

实现这个约束的简单方式是在图样上声明：如果没有特殊规定，所有尺寸相关于主基准 *A*、次基准 *B* 和第三基准 *C*。如果使用第二组定义特征内关系的更紧的公差约束被用来设计匹配零件的孔的实效边界，那么零件二必须缩减轮廓尺寸，以便能够装配入零件一的腔体中。通常这种特征－特征约束的第二组公差框经常出现在第一个零件的销的组合公差框类型的定义中。

第二个零件的轮廓缩减的数量应该等于上、下两组公差框的位置度之差，或上、下两组公差框中定义的实效边界之差。无论是公差或是实效边界，这两种方式计算的结果相同。

这个例子，设计者应该将零件二每边去掉上面得到的差的 1/2，这样可以保证零件二在零件一腔体中保持适当的均匀间隙。

也就是说，如果使用第二组公差框的定义作为匹配零件的实效边界，虽然零件二作为一个整体的阵列可以和零件一的四个销钉装配，但零件需要浮动一个位置来完成装配。因此零

件的轮廓需要缩减相应的尺寸。当然，设计时孔板如果已经定义完整，使用零件一的组合公差框和使用第二组公差框计算销的实效边界，零件一的腔体轮廓尺寸必须增加上、下两组公差框的差量，以保证两个零件的装配。

如果使用尺寸的中心基准特征，并且这个基准特征有自己的轴线或中心面，当设计这个零件去匹配一个特征阵列，定义位置度参考这个尺寸特征的中心基准时，这个基准特征应该是匹配零件的实效边界尺寸（也是功能检具的尺寸）。

下面将讨论这些配合情况：

图7-37中的主零件可以满足配合零件的四个销钉装配，也能保证零件装配后的边沿平齐（或边沿间隙均匀）。

图7-38中的两个零件不能保证装配。因为配合零件有多个销，这些销的实效尺寸是 ϕ14.6mm，不是 ϕ15.2mm。在图7-38所示的配合零件定义中，每个孔的定向实效边界（垂直度的实效边界）匹配相对应的销的实效边界，且在位置度更宽泛的公差带内的任意位置，因此位置度的实效边界不能保证四个销同时装入孔板。

图7-39中的两个零件可以装配，并且能够保证装配后的边沿平齐。图7-39所示的零件有两个位置度实效边界，特征－特征（第二组公差框）的公差带可以处于特征阵列－基准（第一组公差框）定义的公差带内且平行于基准 *B* 的任意位置上浮动，所以可以使用特征阵列－基准的实效边界。

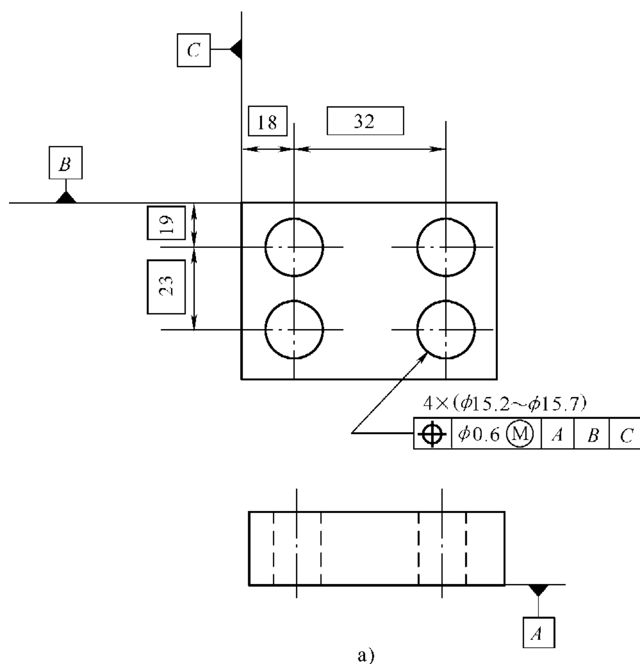


图7-37　配合定义（一）

a）主零件



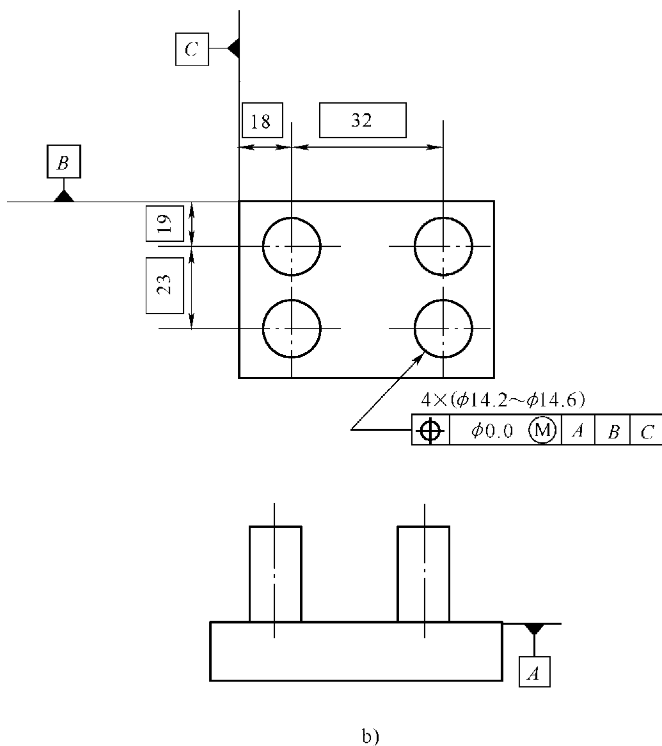


图 7-37　配合定义（一）（续）

b）配合零件

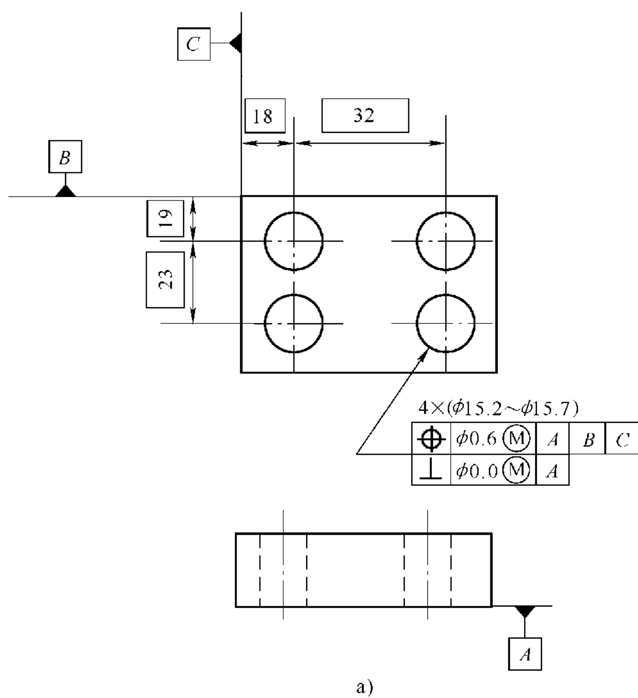
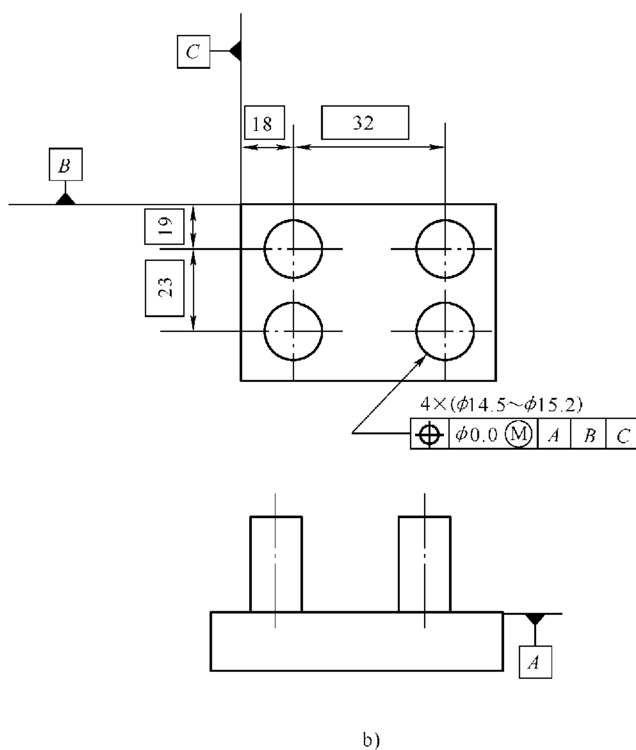


图 7-38　配合定义（二）

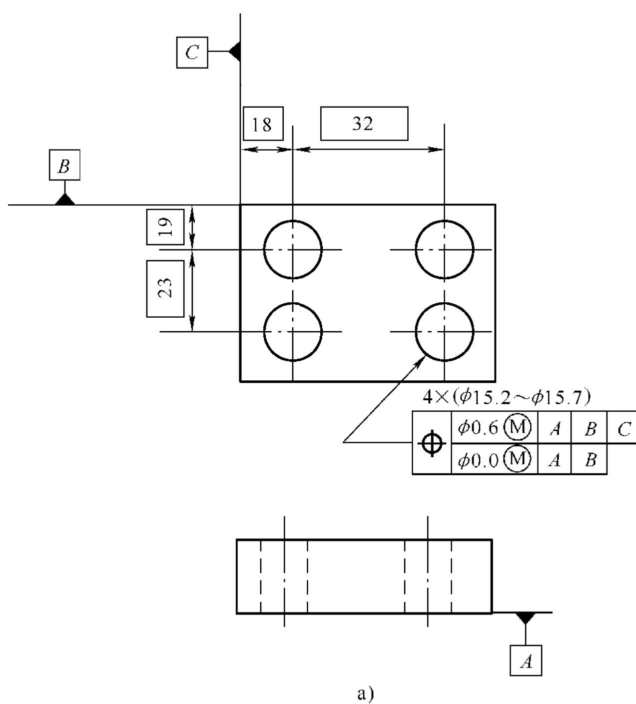
a）主零件



b)

图 7-38　配合定义（二）（续）

b）配合零件

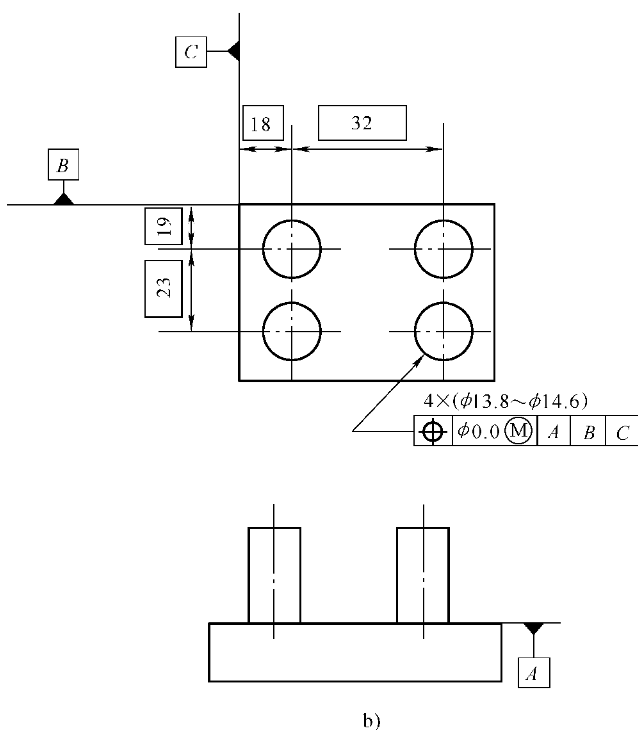


a)

图 7-39　配合定义（三）

a）主零件





b)

图 7-39　配合定义（三）（续）

b）配合零件

图 7-40 中的零件可以和图 7-39 中的主零件配合，但是总成中零件的边沿可能不平齐。配合零件应用了图 7-39 中主零件的第二组公差框的特征内的实效边界，所以可以保证两个零件的孔销阵列的配合。但是阵列－基准的实效边界没有控制，所以装配中，零件可能在不是边沿平齐的状态下装配。

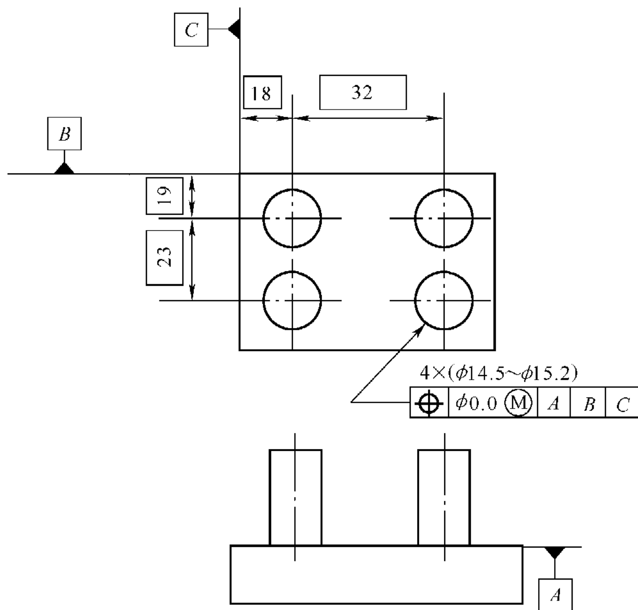


图 7-40　配合定义（四）

图 7-41 中的零件可以和图 7-39 中的主零件装配。图 7-41 和图 7-40 唯一的不同是零件的公称尺寸缩减了，目的是避免在匹配件的边沿平齐。但是这仍然不是一个保证总成的边沿平齐的有效方式。

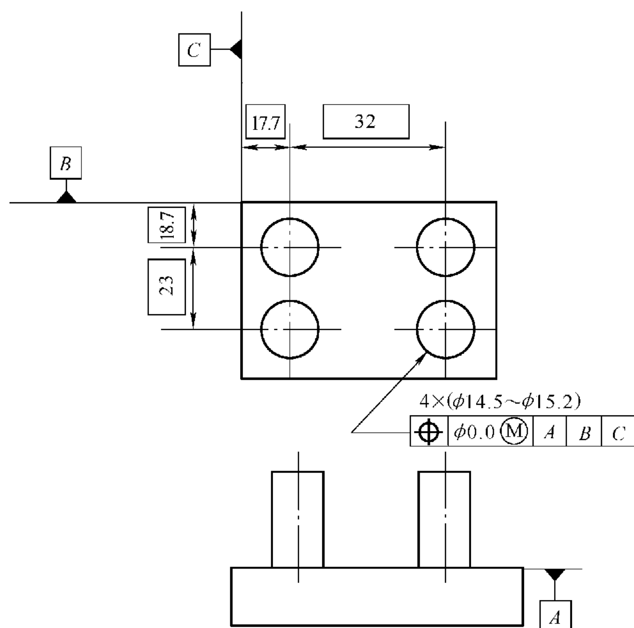


图 7-41　配合定义（五）

图 7-42 中的第一组实效边界是 ϕ15. 8mm，第二组实效边界是 ϕ15. 2mm，所以可以满足销孔的阵列装配，但不能保证总成的零件边沿平齐。

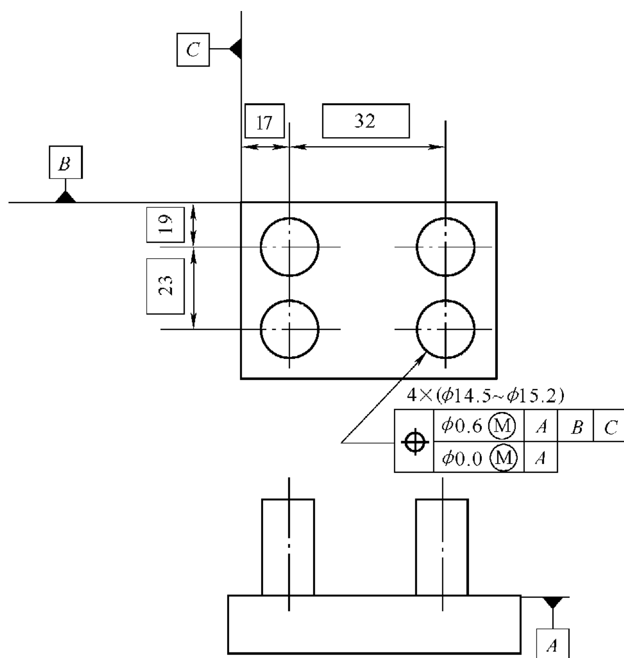


图 7-42　配合定义（六）



图 7-43 中的零件的实效边界是 $\phi15.2\text{mm}$，所以可以满足阵列特征的装配，但是不能保证零件在总成中的边沿平齐。

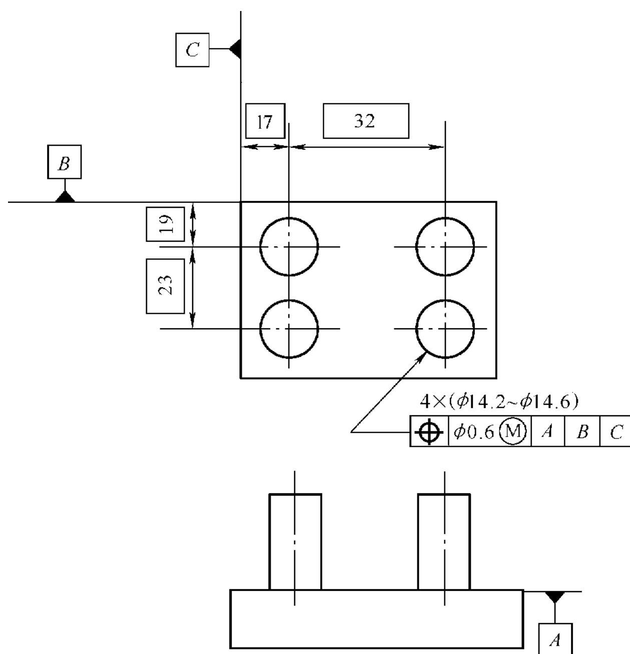


图 7-43　配合定义（七）

请考虑以下问题：

1）在应用 MMC 条件时，如何保证受控特征会匹配且各自基准会平齐对齐（假设相应基准上的公称尺寸相同）。

2）对于图 7-43 中的定义，匹配件和主零件的相对于基准的实效边界不同（轴的基准上的实效边界大于孔的基准上的实效边界），如果 MMC 修正的实效边界能够匹配，那么特征可以匹配，但是基准不能保证平齐。

3）如果销（外部特征）位置度的特征阵列 – 基准的实效边界等于或小于匹配孔（内部特征）的位置度的特征阵列 – 基准的实效边界，那么两个零件可以满足装配，且基准也可以保证平齐。这取决于两个零件的基准设置和公称尺寸都是相同的。

4）如果 MMC 修正的轴位置度实效边界（不管是特征阵列 – 基准或特征 – 特征）等于或小于孔的 MMC 修正的最大的实效边界，它们可以满足装配，但是总成中零件的边沿不平齐。

十六、对于组合公差框控制的尺寸特征的匹配设计

在完成图 7-44 所示零件的配合件设计（图 7-45），必须先考虑以下几个因素：

1）确定配合件的最大实体状态的理想轮廓和定向，以确保图 7-45 所示的零件能够装配入图 7-44 所示零件的腔体中（小于腔体的 MMC）。可以通过不同的方式来实现，但都离不开 MMC 的匹配计算。需要确保两个零件 MMC 尺寸特征的轮廓形状和垂

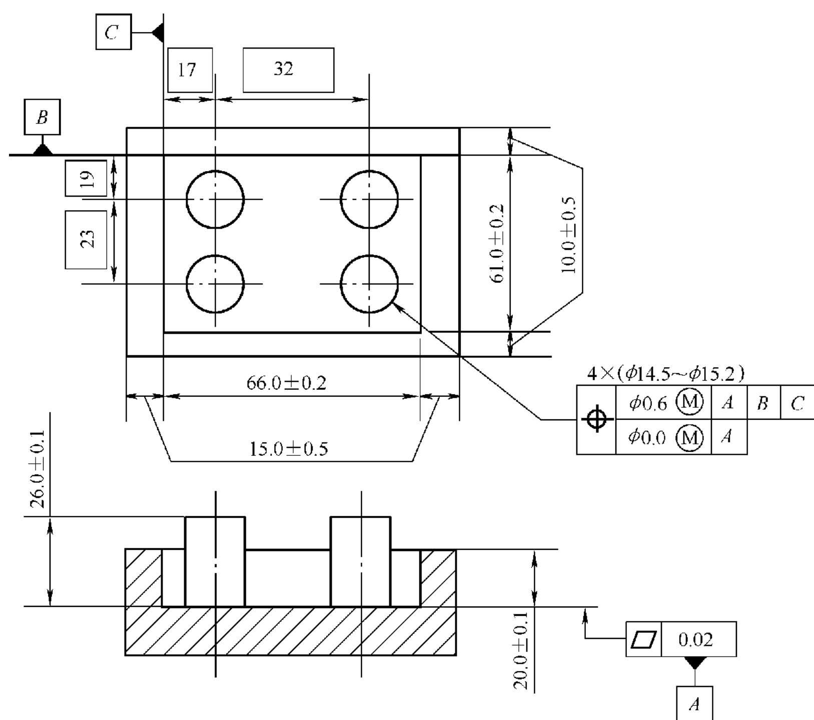


图 7-44　匹配设计

直度相互匹配。

2）孔在 MMC 条件下的实效边界不能超出匹配销在 MMC 条件下的实效边界。这可由不同的方式来实现。假如选择了适当的基准特征（代表匹配特征），设计者可以选择在图 7-44 中使用的相同的公称尺寸，以定位匹配件的孔的实效边界尺寸（ϕ15. 8mm）。这也可以确保销阵列（实效边界尺寸为 ϕ14. 5mm）可以插入孔板。因为每个销的浮动边界是 ϕ15. 8mm，所以孔板的最终设计结果可能如图 7-46 所示。

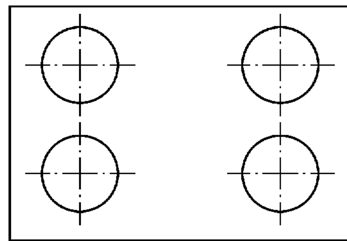


图 7-45　配合件（图 7-44 的配合件，这个矩形孔板上的四个孔与销配合，且这个零件外轮廓能够配合入图 7-44 所示零件的腔内）

如果设计者选择使用 ϕ15. 2mm（特征内关系的实效边界）作为孔板上孔的设计尺寸，而不是 ϕ15. 8mm，如图 7-47 所示，会导致干涉。只有孔的轴线恰好处于 17mm 的公称尺寸上，四个孔理论上可以和四个销钉配合，并且整个孔板也可以配合入销板的腔中。但是即使是 ϕ15. 2mm 的孔稍微有一点的偏差，都会导致在基准 *C* 或 *B* 上的干涉，孔板的矩形轮廓尺寸需要相应地缩减才能完成装配。

这个缩减的尺寸为（假如为图 7-47 所示的装配状态）15. 8mm 和 15. 2mm 的差，即两边同时缩减 0. 6mm（单边 0. 3mm），两零件既能完成销孔装配，也能完成孔板的矩形轮廓和销板腔体装配，如图 7-48 所示。



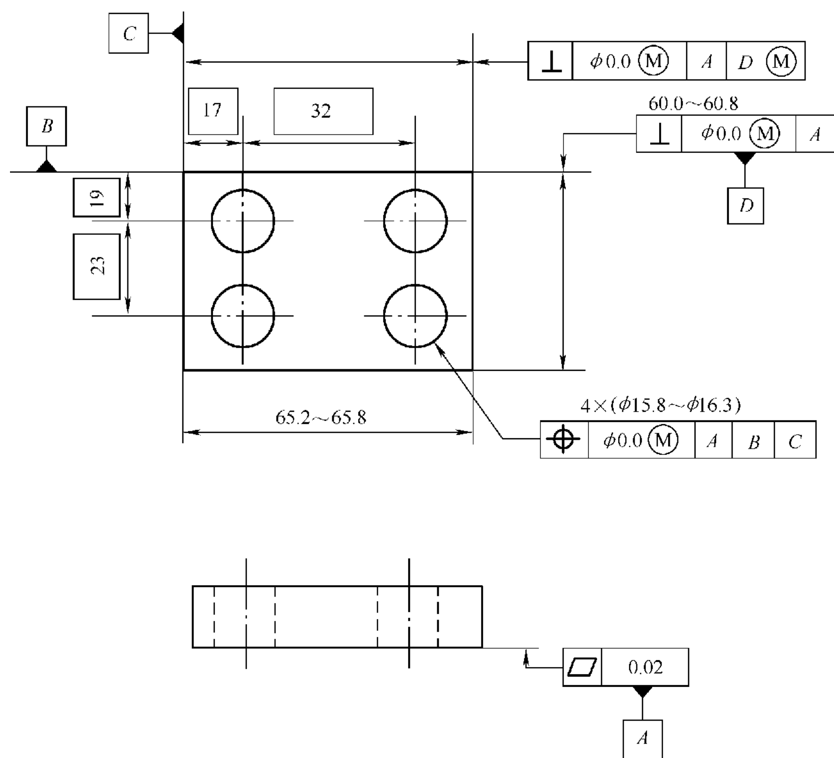


图 7-46　配合件的定义

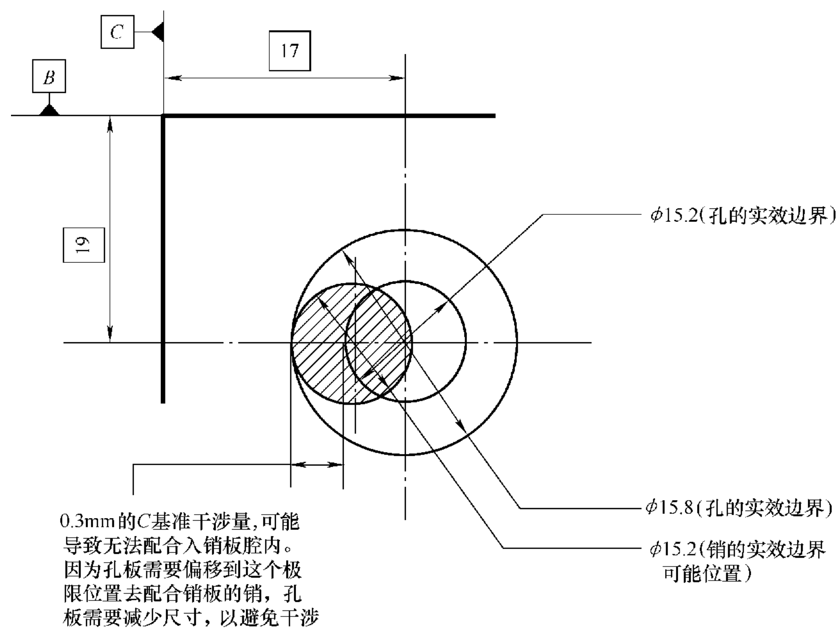


图 7-47　公差带的解释

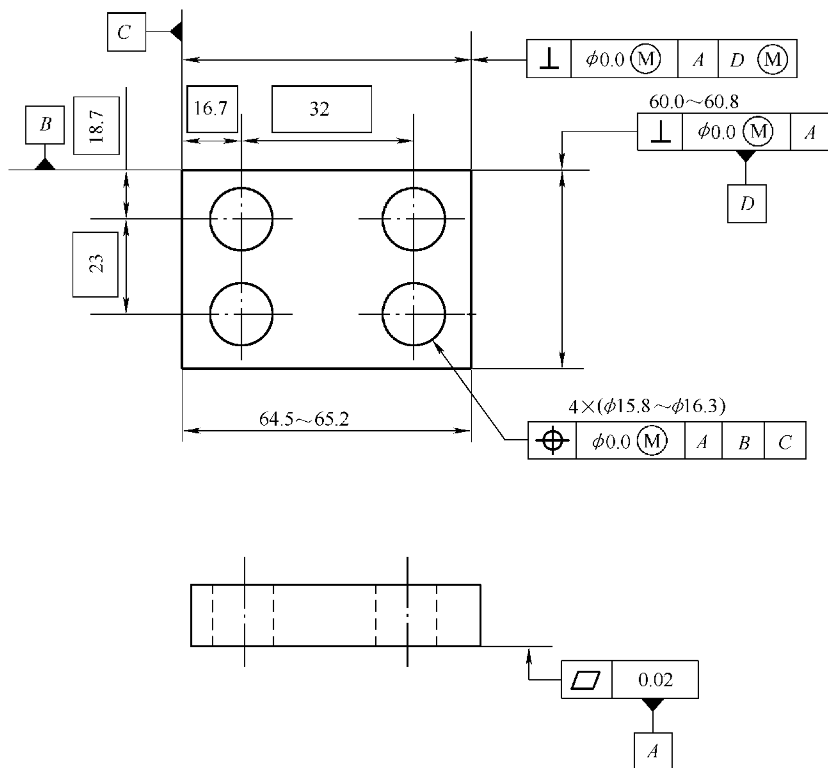


图 7-48　配合件的定义

十七、组合公差控制框和独立组合公差控制框的区别

ASME Y14.5 中明确区分了组合公差控制框和独立组合公差控制框，如图 7-50 所示。

如果基准特征 *B* 是一个平面，定位一个阵列孔的公称尺寸起始于基准 *B*，那么在这两种公差控制框中的意义完全不同。

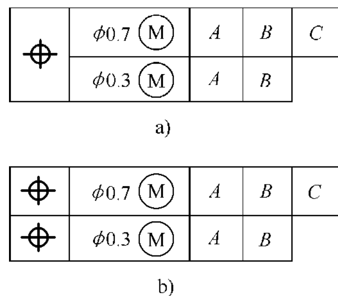


图 7-49　两种公差控制框的对比
a）组合公差控制框
b）独立组合公差控制框

这两种控制框中，都有必要的阵列特征内的关系定义。这个更小的公差带进一步约束了阵列内特征间的位置关系（这个例子是孔和孔之间的公差）。同样，如果每组第二行公差框中没有基准参考，或者说第二行公差框中参考了第一行公差框中的主基准（用来作为垂直度的控制），那么两组公差控制方法是一样的。

但是如果第二行公差框中参考的唯一基准与第一行的不同，或者和第一行的基准参考顺序不同，或者第二行引用的基准在第一行中的作用是定位的，那么这两种控制方式意义不同。

在一个组合公差控制框中，只有第一行公差框（阵列的定位公差）中的基准可以被第二行公差框（阵列特征内相关公差）引用。如果第二行公差框（阵列特征内相关公差）引用了不止一个基准，这个基准引用顺序必须同第一行（阵列的定位公差）相同。例如，第一行公差框（阵列的定位公差）中的主定位基准不能成为第二行公差框（阵列特征内相关



公差）的第二基准。

在独立组合公差控制框中，第二行的控制框引用的基准不必和第一行的控制框引用的基准或顺序相同。实际上，由于上下两行的公差框完全独立控制一个相同的阵列，基准的如何选择完全取决于设计者的设计意图。

在组合公差控制框中，第二行控制框引用的基准用来约束受控特征相对于这些基准的定向。第二行的控制框中仅适用于倾斜度约束。第一行的控制框（阵列的定位公差）引用的基准起到约束倾斜度或定向（如一个孔阵列对于基准的公差）的。在第二行的控制框（阵列特征内相关公差）中引用的基准起到进一步约束倾斜度或定向的目的（如孔对于同一个阵列中其他孔的公差，销对于同一阵列中其他销的公差）。

在独立组合公差控制框中，第二行的公差控制可能是对第一行的公差框中的公差的进一步约束，或者是参考一组完全不同的基准。如果第二行引用的基准出现在第一行的公差框中，并且顺序相同，则它们是对第一行控制框中的公差的进一步约束。定向基准进一步约束定向，定位约束进一步约束定位。

两种公差控制框的解释如图 7-50 和图 7-51 所示。

⌖	φ0.7Ⓜ	A	B	C
⌖	φ0.3Ⓜ	A		

⌖	φ0.7Ⓜ	A	B	C
	φ0.3Ⓜ	A		

这两种公差控制方式意义相同，解释如下

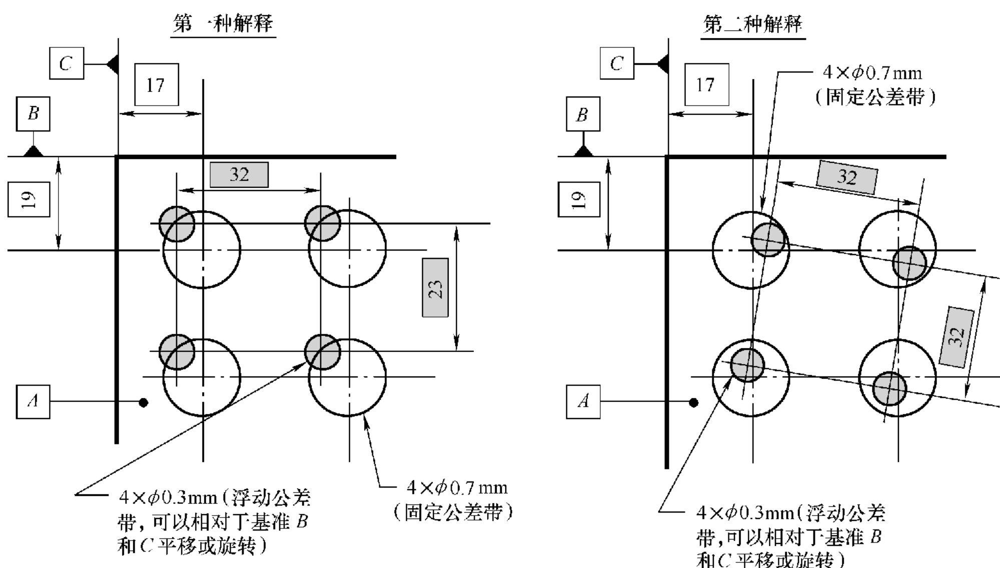


图 7-50　两种公差控制框的解释（一）

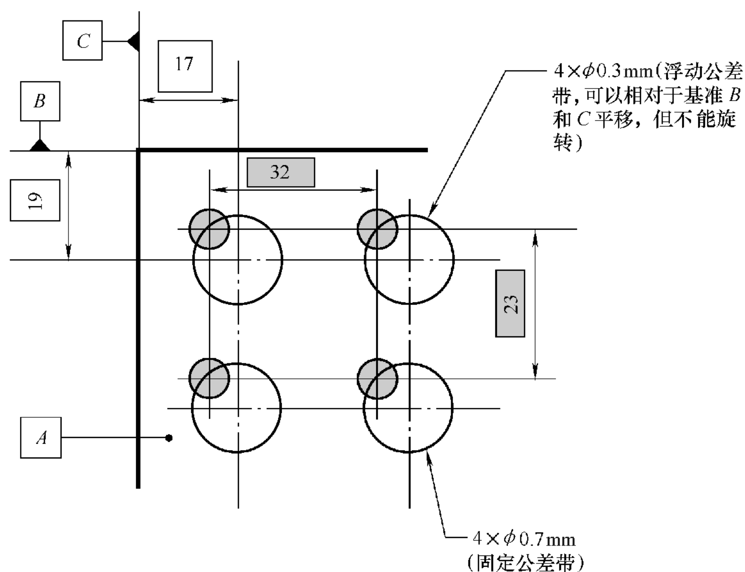
图 7-52 中只有一种可能的阵列与基准和基准内部特征间的公差带分布情况。

图 7-53 所示是独立组合公差控制框的公差带分布描述。

十八、初始定位的方式

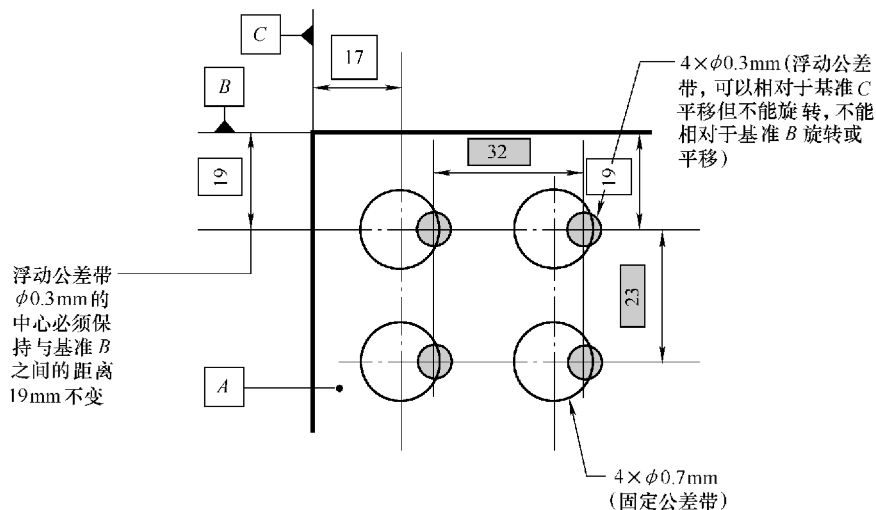
初始定位是零件上其他特征的定位基础。实际的设计过程中经常有这样的情况，一个零

⌖	ϕ0.7Ⓜ	*A*	*B*	*C*
	ϕ0.3Ⓜ	*A*	*B*	



a)

⌖	ϕ0.7Ⓜ	*A*	*B*	*C*
⌖	ϕ0.3Ⓜ	*A*	*B*	



b)

图 7-51　两种公差控制框的解释（二）



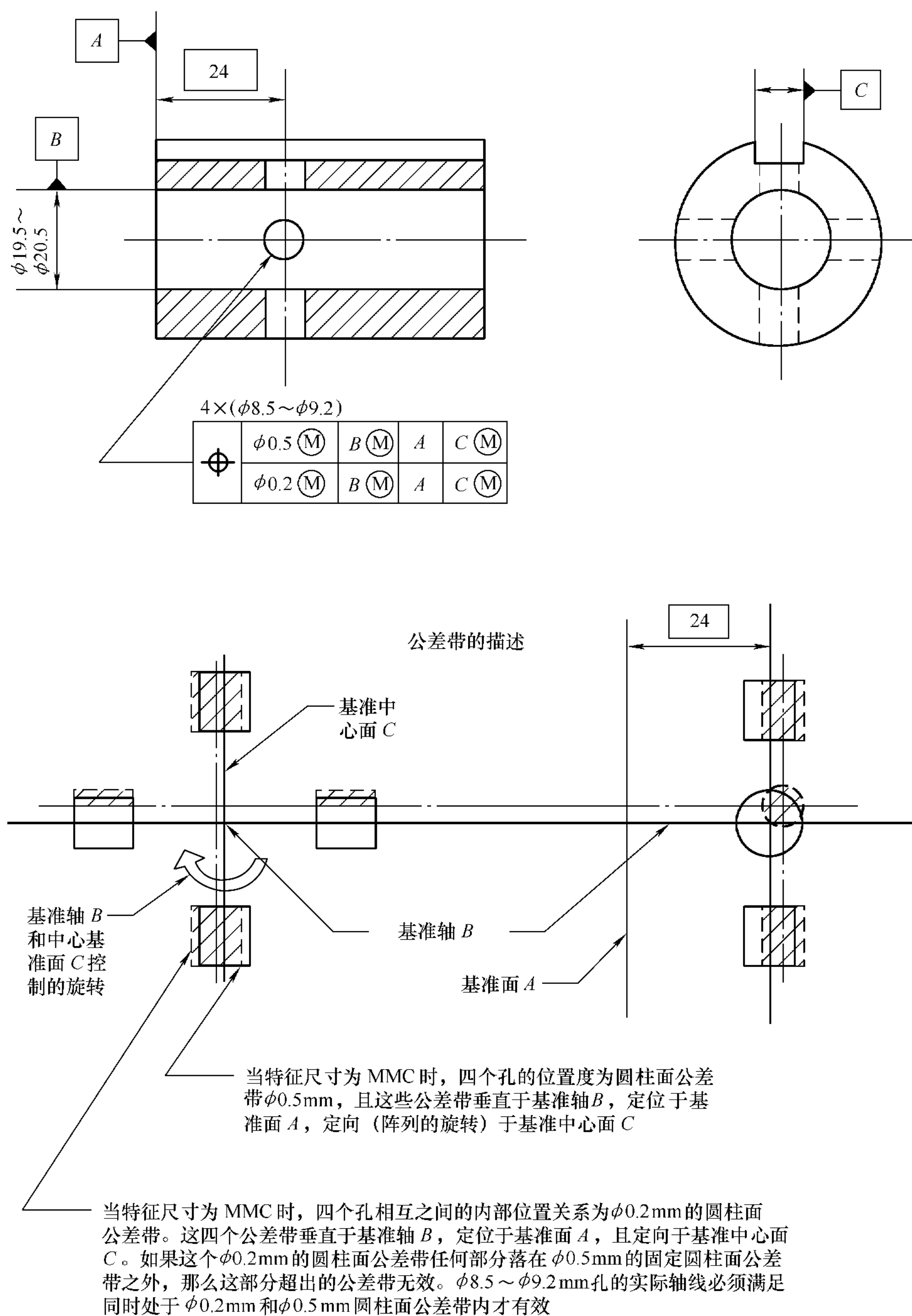


图 7-52　一个零件的定义及公差带解释（一）

件的第一个定位（公差很大）的特征可以作为一个基准，零件上的其他多个特征参考第一个特征定位。设计者可以将这个基准作为后续参考特征的定位起点。

如图 7-54 所示，9 个阵孔的测量基准被宽松地定位。基准 *D* 被宽松地定位于基准 *A*、*B* 和 *C* 上。结果，9 孔阵通过基准 *D* 定位于零件的基准 *A*、*B* 和 *C* 的上。

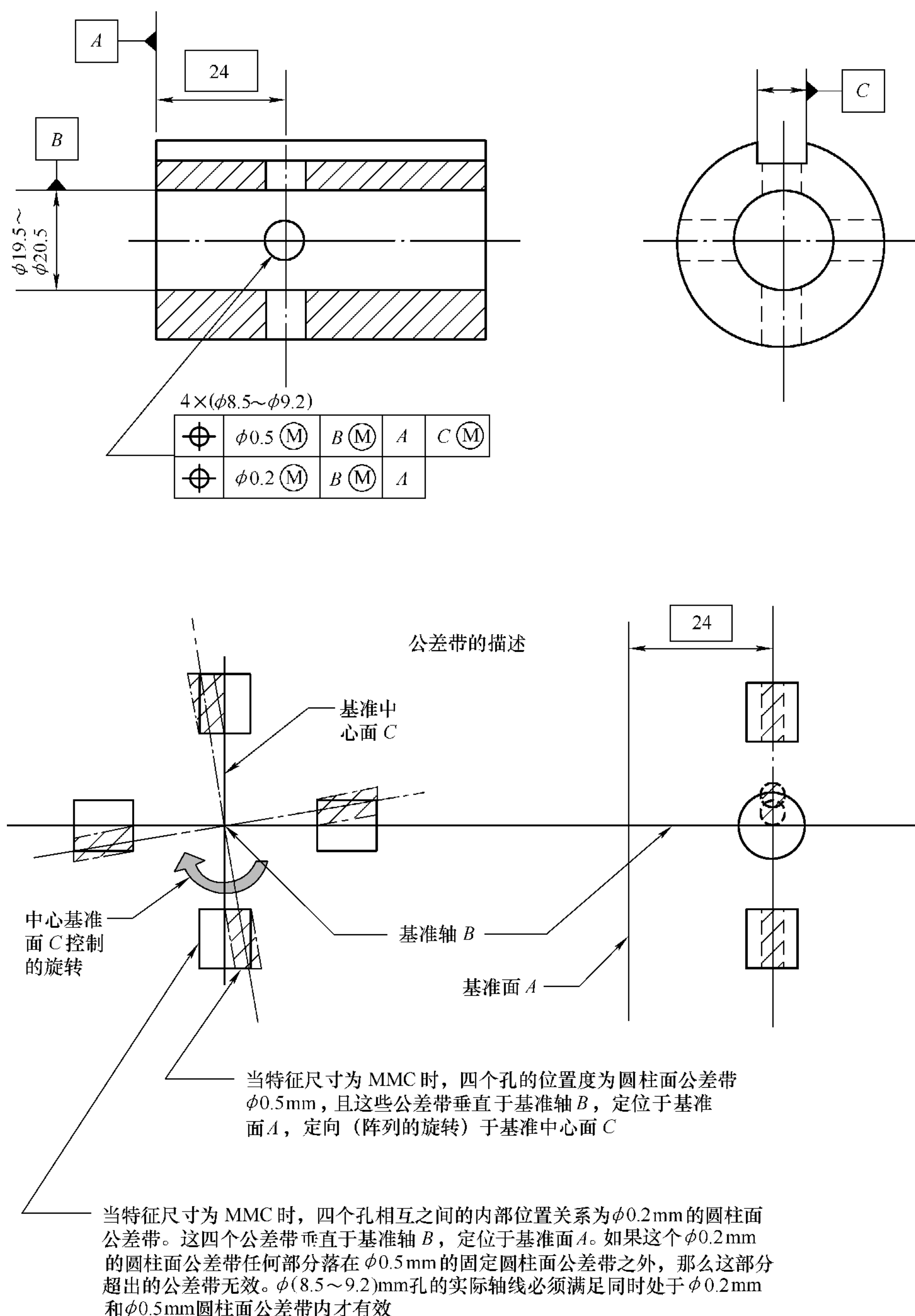


图 7-53　一个零件的定义及公差带解释（二）

十九、尺寸公差到位置度公差的转换

这个转换的目的是得到一个零件位置度公差，然后依据位置度公差的实效边界设计这个零件的配合件。对于一个零件的初始设计，明白这个转换过程，也可以开始几何公差设计。



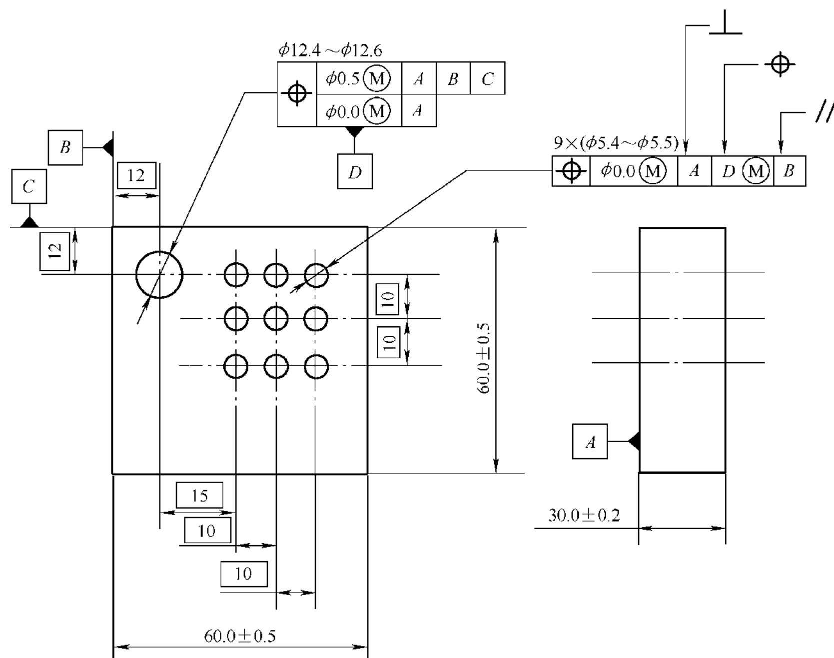


图 7-54　位置度的定义

位置度的三个优点归纳如下：

1）圆柱面公差带相对于矩形公差带更能代表受控特征的功能。

2）基于基准的定位可重复性强。

3）使用 MMC 修正，可以降低成本。

图 7-55 所示由尺寸公差定义的零件可以有很多的解释，这样就造成了即使是按照图样设计配合零件，也不能保证零件的装配。

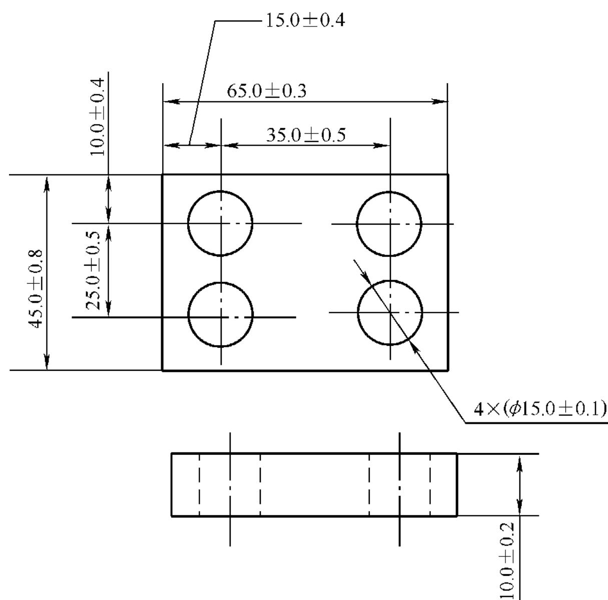


图 7-55　尺寸公差定义的零件

转换第一步：定义基准。首先需要指定基准。通过图 7-55 所示的尺寸公差图，尺寸线起始于特定的边线。这些边线可以定义为定位或定向的基准特征，如图 7-56 所示。

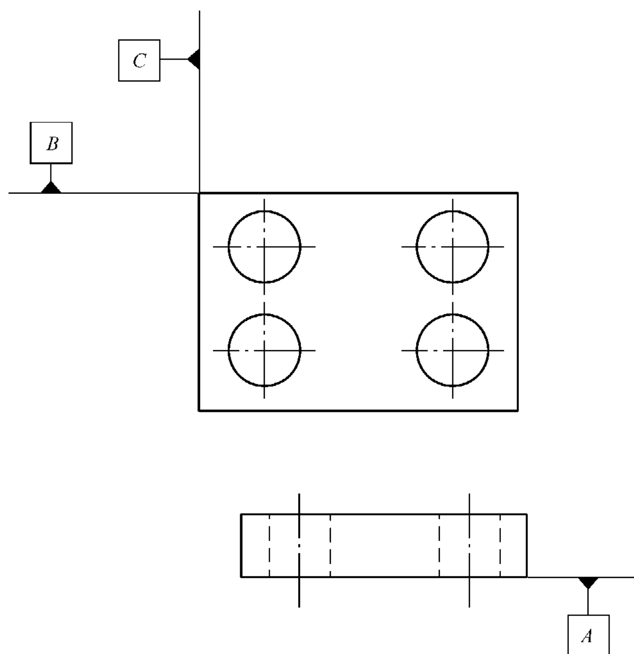


图 7-56　定义基准

第二步：定义公称尺寸，如图 7-57 所示。

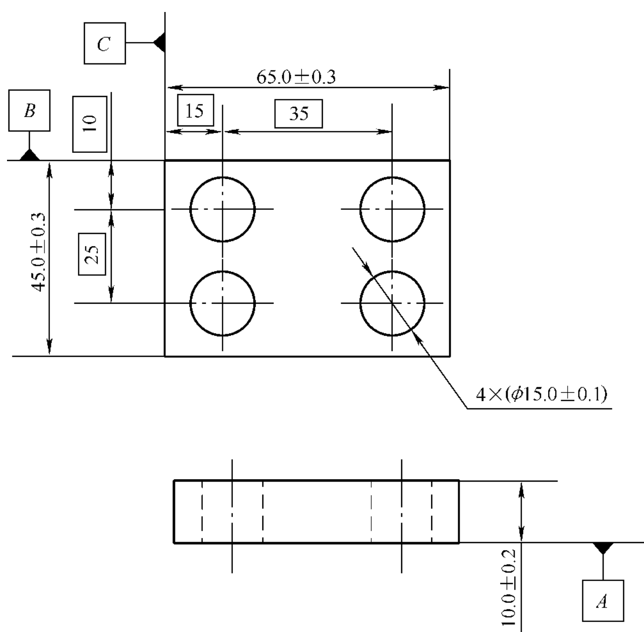


图 7-57　定义公称尺寸



第三步：转换矩形公差为圆柱面公差（基准－孔阵）。首先计算孔阵到基准的公差带，这个公差是 $T=0.8\text{mm}$。假设基准不需要分配公差，所有的公差都分配给孔阵。

如图 7-58 所示，尺寸公差的矩形公差带可以转换为基准－孔阵的圆柱面公差带，计算公式是：$\sqrt{2T^2}=0.8\text{mm}\times\sqrt{2}=1.1\text{mm}$。既然设计原则是降低成本，并且同时保证孔不会太靠近边缘而影响零件的强度，所以公差指定的原则是尽可能地扩大可用公差，但不能影响最小壁厚。一旦选定了公差，就应该确认最小壁厚，然后才是位置度公差的指定。这个公差指定显然是一个组合公差框（基准－阵列和特征－特征）控制。这一步确认了组合公差框的第一组公差控制（基准－阵列），如图 7-59 所示。

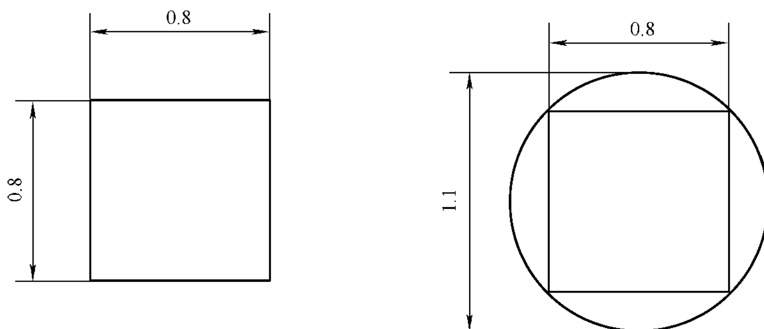


图 7-58　尺寸公差和几何公差转换的原理

因为假设这个孔阵是间隙孔，同销轴或螺栓配合，所以选择使用 MMC 修正。MMC 修正后的公差可以使位置度公差得到补偿，达到了降低成本的目的。因为功能原因，指定的基准的顺序是主定位基准 A、次定位基准 B 和第三定位基准 C。这里要考虑实际的加工和检测的可行性。

4×(ϕ14.9～ϕ15.1)

⌖	ϕ1.1Ⓜ	A	B	C

图 7-59　公差控制框设置

第四步：指定第二行公差控制框的公差（特征－特征）。注意这步公差指定不能像基准－孔阵的计算方式，不能使用 ±0.5mm 的偏差。先确定需要配合的是浮动的还是固定的紧固件。例如，如果是固定的紧固件，孔的 MMC（$\phi14.9\text{mm}$）减去紧固件的 MMC（假设为 $\phi14.5\text{mm}$），那么公差为 $\phi0.4\text{mm}$（$\phi14.9\text{mm}-\phi14.5\text{mm}$），这个公差需要孔和紧固件进行分配。但如果是一个浮动的紧固件，孔的 MMC 减去紧固件的 MMC 所得公差全部应用到孔上。

这种公差的计算方式保证了零件的配合。完成了第二行公差控制框中的公差值指定，还需要指定基准 A 作为主基准。这个例子中，主定位基准 A 的作用是稳定零件。虽然第二行公差控制框的作用是控制孔－孔之间的位置关系，基准 A 的引用（垂直度）也可以起到这个位置关系的加严作用。如果基准 B 也被引用，仅仅是对于这个基准的旋转约束。如果想加严定义孔阵特征与基准 B 的定位关系，组合公差控制框就不再合适了，需要使用独立组合公差控制框，如图 7-61 所示。

4×(ϕ14.9～ϕ15.1)

⌖	ϕ1.1Ⓜ	A	B	C
⌖	ϕ0.4Ⓜ	A	B	

图 7-60　独立组合公差控制框

符号 M 说明了对配合件的设计要求，应该倾向于加工偏大的孔。图 7-61 所示为完整的

几何公差控制定义。

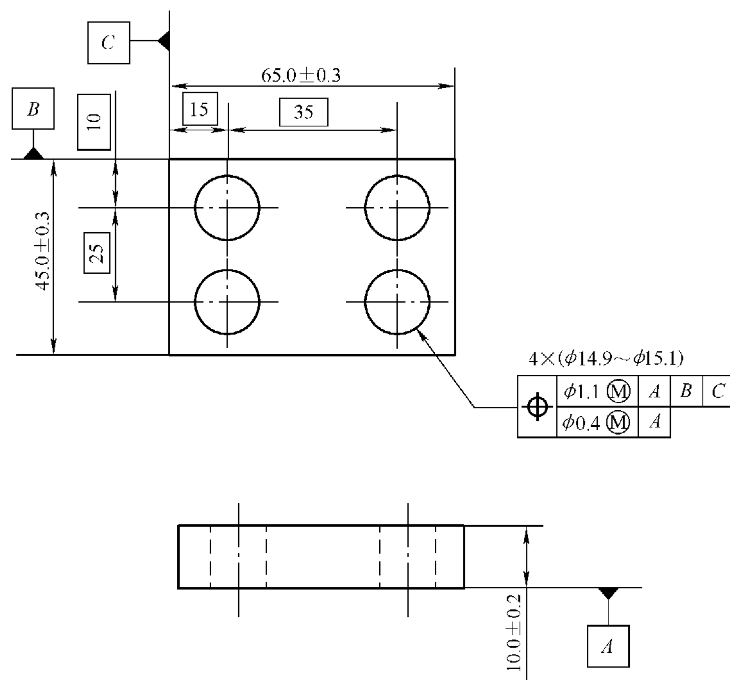


图 7-61　完整的几何公差控制定义

二十、允许偏差和实际偏差

允许的偏差为受控特征的公差带范围。如果受控特征的公差带为圆柱面，允许偏差为以理想位置为轴线，以公差值为直径的一个圆柱面公差带。允许偏差要综合考虑公差控制框中的几何公差加上来自于尺寸公差的补偿公差。

当孔或轴类特征使用 MMC 修正定义尺寸时，允许使用补偿公差。当这些特征的尺寸由 MMC 向 LMC 变化时，位置度公差可以获得额外的增加。换句话说，就是公差增大了。实际加工后的轴或孔类特征如果位于这个圆柱面公差带内，那么这个特征可接受为合格。

这个实际位置的偏差值可以这样确定：通过 CMM、光学比较仪、检具等都可以用来确认孔或轴的轴线位置。

二十一、补偿公差

这个篇幅讨论如何计算补偿公差，也深究其中的补偿原理。当检测一个零件时，只是想简单地知道这个零件是否能够满足功能。如果满足功能，接收为合格零件；如果不能，那么报废或重新加工。

为了能够很好地判断一个零件的功能，检测者应该知道这个零件是如何工作的。大多时候，检测者仅仅通过图样来判断这些。实际检测工作中，检测者对于待检的零件很少有很深的了解。检测者必须仔细阅读说明零件功能的图样。如果图样定义得很完善，基准和公差控制框确实能够帮助检测者很好地判断一个零件，也能建议加工工艺以改善控制点。



图 7-62 中的图符和位置度控制叙述了受控孔特征的技术要求：一个配合零件，安装在 *A* 面上，其上的配合孔定位于基准 *B* 和 *C*。也可以解释为：如果受控孔的实际加工尺寸为 MMC，孔的轴线的位置度在 ϕ0.5mm 直径的圆柱面公差带内，且孔的轴线垂直于主定位面 *A*，定位于第二基准面 *B* 和第三基准 *C*。

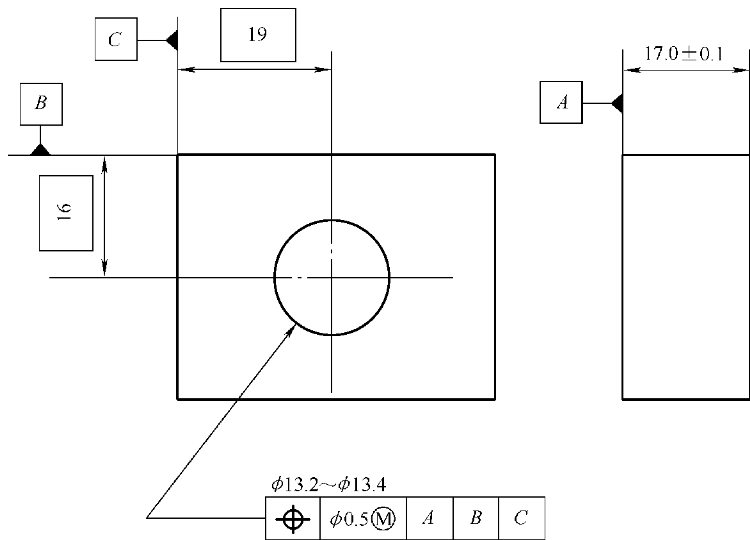


图 7-62　一个使用 MMC 修正的几何公差控制零件

解读孔的功能需要理解图符隐含的逻辑意义。从位置度考虑，定位了一个孔，位于 *A* 面（至少三点接触 *A* 面），定位于 *B* 面和 *C* 面。然后需要解决的问题是：①对于这个圆孔，它的匹配特征是什么？显然会是一个轴类特征；②这个匹配轴的最大尺寸是多少？规定的尺寸范围、垂直度和定位要求的孔能够配合的轴的尺寸范围、定向和相关基准定位要求。

匹配轴的最大尺寸是实际加工孔的尺寸减去允许的公差。如果将每一个结果罗列出来，会发现这个值是一个常值，即 MMC 条件下的实效边界。这个实效边界是一个理想的圆柱面，以理想状态定向于基准面 *A*、定位于基准面 *B* 和 *C*。实现装配的孔需要大于或等于这个边界。匹配的销或轴类零件的尺寸和公差（尺寸公差和定位公差）要设计在这个边界之内。如果清楚了这些要求，检测者可以确定接收零件的信心，确保每个零件都能完成装配。以下是实效边界计算的例子：

实际的孔的尺寸		允许的偏差		实效边界
ϕ13.2	−	0.5	=	ϕ12.7
ϕ13.3	−	0.6	=	ϕ12.7
ϕ13.4	−	0.7	=	ϕ12.7

当孔的实际加工尺寸和允许的几何公差发生变化时，匹配边界不会发生变化。检测者可以判断，如果孔没有超出这个边界，那么这个孔就能够匹配加工尺寸最大情况时的匹配轴，也就是说可以匹配所有按要求生产的轴。进一步对于固定的匹配轴类零件，如果孔大于或等于这个边界，而轴小于或等于这个边界，并且轴的轴线处于理想位置，所有的轴都可以保证装配要求。

二十二、非圆柱面匹配特征的位置

对于非圆特征（如长圆孔）的装配，也可以使用位置度来定义，应用的基本原则同圆柱面特征。不同的地方是，既然特征是非圆柱面，公差控制框中就不合适继续使用直径公差符号。像长圆孔或凸缘，联合基准特征和公称尺寸建立起中心面，或者如对称度控制，使用RFS或MMC修正的尺寸基准特征的中心面。这个中心面处于理想的设计位置，特征的实际中心面必须位于两个平行面之间，这两个平行面等距于理论中心面两侧定位。这个平行面公差带根据特征控制框建立，平行面的位置和之间的间距为公差控制框中的数值，理论的中心面是这个公差带的中心面。

这种位置度控制非圆柱面特征的另一种检测方式是验证这些特征的实效边界。例如长圆孔（内部特征），实际加工的长圆孔上的元素不应小于MMC修正下的实效边界。

长圆孔可以通过一个或两个位置度控制的特征控制框定义。特征控制框建立了一个边界。这个边界同心于理论设计位置。在MMC修正下，几何公差控制框产生一个实效边界（等于特征孔的MMC减去位置度公差）。长圆孔显然有两个MMC（不考虑长圆孔的深度，即对于安装面的垂直度）。所以实效边界也是一个理想的长圆孔。

当实效边界的尺寸、形状和位置定义下来，实际加工的特征面就有了比较和参照。如果所有实际加工的特征面都大于这个边界，本特征合格。可以看出，MMC修正下产生的实效边界是特征的MMC和位置度公差的综合结果。如果两个方向上的位置度公差相同，对于受控特征，用一个公差控制框已足够定义这个长圆孔。

这个没有直径符号的唯一公差控制框可以定义长圆孔的公差分布。如果在长圆孔的一个方向要求比另一个方向更多的公差，那么两个公差控制框就是必要的了，在公差控制框的下方最好注明“边界”的提示，如图7-63所示。

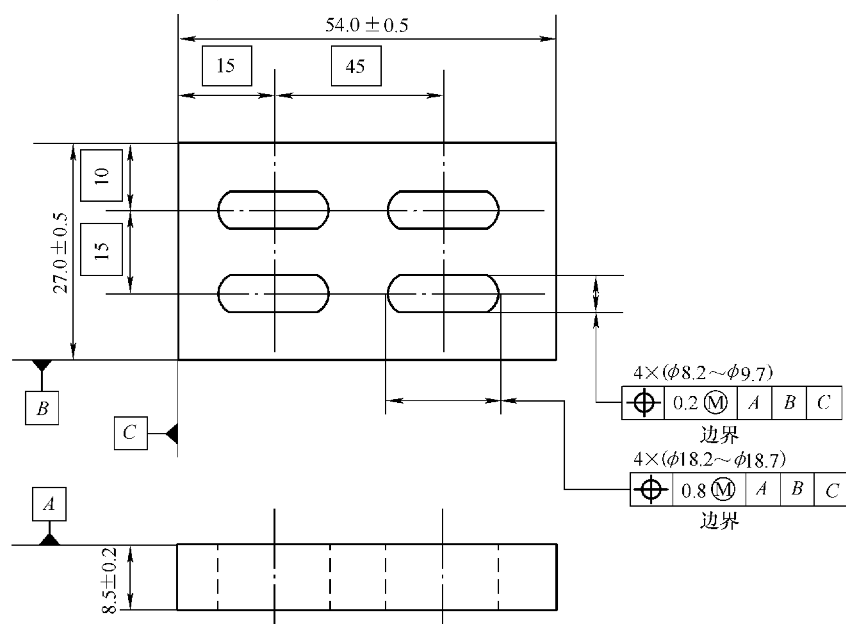


图7-63　槽形孔的位置度控制



图 7-64 是对图 7-63 的解释。实际加工孔的尺寸和允许的几何公差偏移量不会影响匹配边界（保持常量）。检测者可以使用这个能够保证最差匹配条件的边界去验证实际加工的零件。如果长圆孔大于或等于这个边界，而轴小于或等于这个边界（轴的轴线或中心线位于理想设计位置），不会发生干涉，能够完成装配，这就是一个合格的特征。

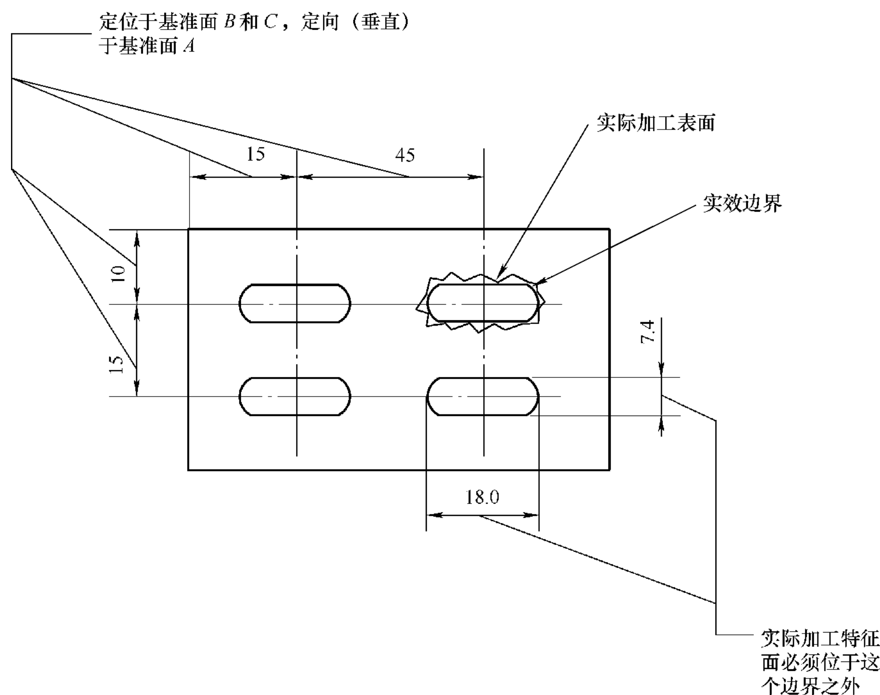


图 7-64　槽形孔位置度图解

二十三、位置度边界

传统位置度控制的边界概念已经被延伸应用，不再考虑特征的形状。在这样规定之前，位置度控制只应用于长圆孔、球形特征和平行面特征（如尺寸特征）。

这些特征中，除了长圆孔，其他特征的公差带都是约束一个尺寸特征的轴线或中心面。这些公差带产生了一个受控特征面的偏移边界。如果在 MMC 修正下，这个边界即是实效边界。对于一个内部尺寸特征（如孔），这个边界小于这个尺寸特征的 MMC。对于一个外部尺寸特征（如轴），这个边界大于这个尺寸特征的 MMC。

只有在长圆孔的情况下，公差带不必考虑轴线或中心面，只考虑极限边界。在最新的 ASME Y14.5 标准中，这个边界的概念被延伸到其他特征定义中，其法则同长圆孔情况。如 1994 版的 ASME Y14.5 标准中显示了一个异形孔的定义。这个特征首先被公称尺寸定义大小、形状和位置。一个轮廓度（稍后介绍）控制定义了一个等边分布的公差带。主定位基准特征被用来控制这个轮廓的垂直度，即零件位于安装面上的稳定性（有利于加工或检测）。可以认为这个轮廓度控制产生了一个 MMC 边界（仿形于理论特征轮廓）。一个位置度公差指向这个异形孔，并在公差控制框下值指明“边界”。

公差控制框下的“边界”说明了仅仅评估受控轮廓是否超出受控特征的 MMC 轮廓减去

位置度公差产生的边界。这个内部特征的轮廓面必须大于或等于这个位置度约束的边界。在这个面控制中，要注意直径方向上缩减位置度公差的一半。图 7-65 中是一个连续的面，创建于基本轮廓等距面上。

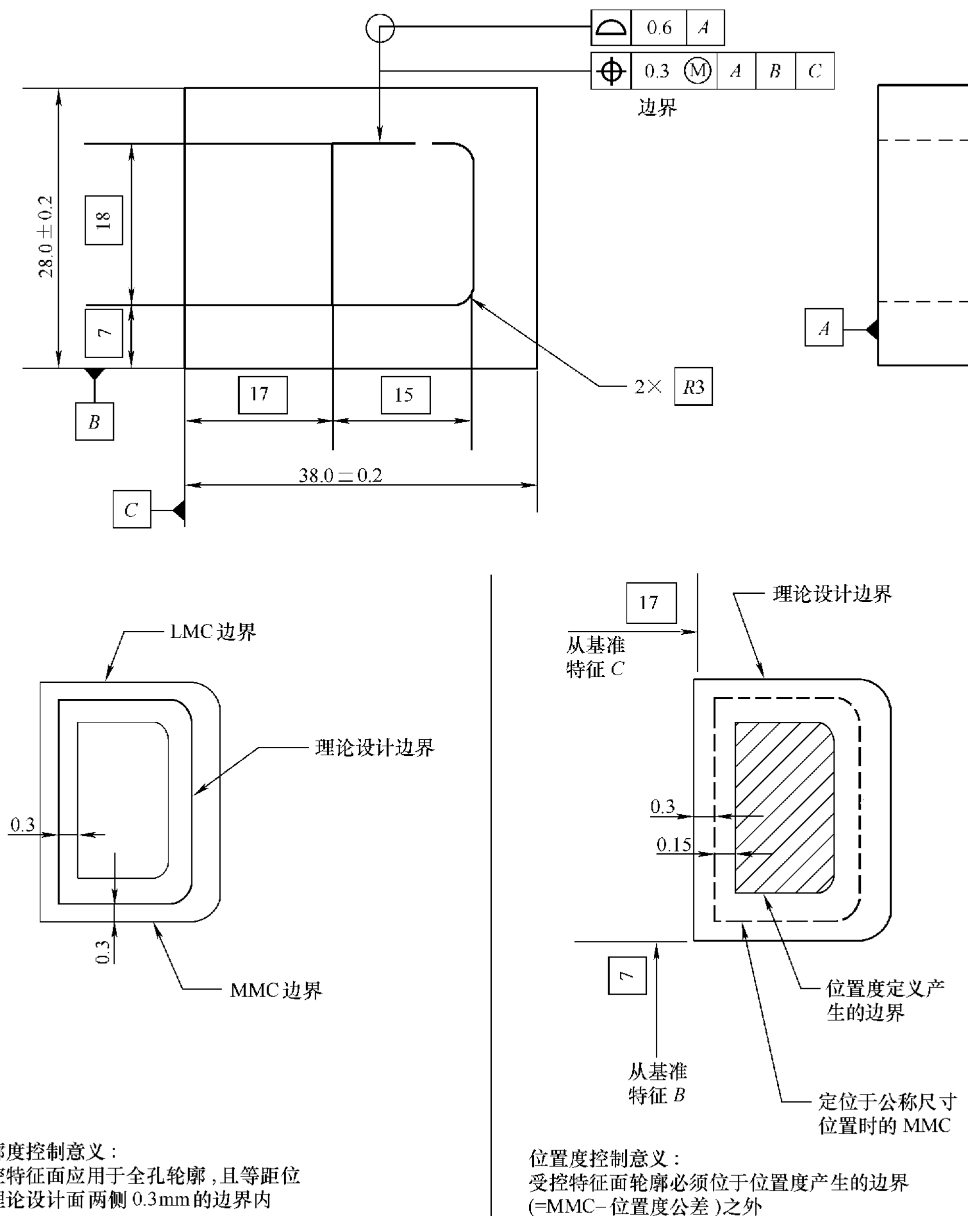


图 7-65　异形孔的位置度定义及公差带

单单一个组合轮廓度公差控制框不能达到相同的控制结果。组合轮廓度公差控制框的第一组公差框用来定位特征，相对于第二组公差控制框，公差带较宽。第二组公差控制框对于特征的轮廓进行更精确的约束。这与图 7-65 产生的效果不同。

并且，如果一个轮廓度控制联合基准特征来定位一个轮廓，每一组公差框产生两个边



界，以精确约束轮廓面。MMC 修正的位置度只产生一个边界（对于内部特征，为内边界；对于外部特征，为外边界）。位置度控制使得轮廓特征的浮动和定位约束更宽松，并且易于检测，可以使用功能检具进行属性检测。

一个功能检具能够非常容易地检测由位置度控制的常量边界。然而，如果使用一个功能检具检验一个轮廓度，对于验证轮廓的内外边界将是异常困难的。CMM 也可以实现轮廓度的检验，这种方式被称为柔性测量方式。因为 CMM 能够适应不同零件的轮廓。

二十四、位置度控制的对称度（RFS）

图 7-66 中的公差带是两个平行面，以基准特征 C 的中心面为中心，平行间距为 0.15mm，公差带垂直于基准面 B。

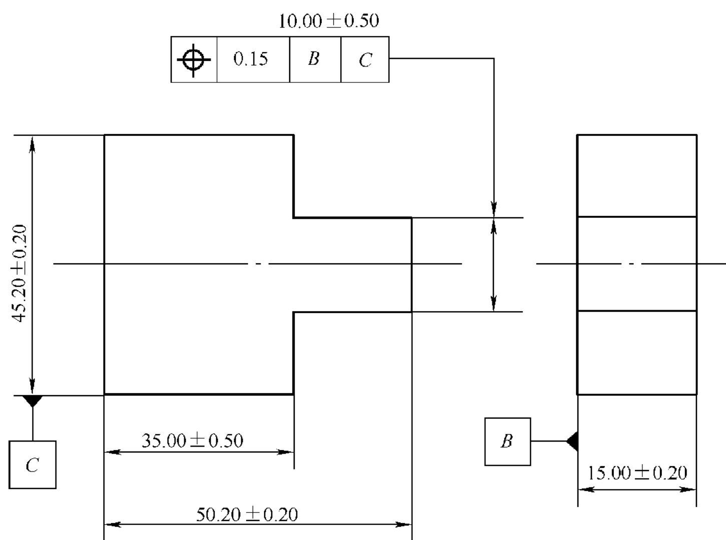


图 7-66 位置度控制的对称特征

二十五、位置度控制的对称度（MMC）

图 7-67 中的公差带因为被 MMC 修正，所以可以获得尺寸公差的补偿。垂直度约束将面的控制转移到中心面控制。

二十六、两个方向上的位置度控制

一个特征的位置度公差有时分布不均匀，其中一个方向需要更精确的控制，而另一个方向处于成本考虑，可以放宽公差要求。这种情况就需要两个公差控制框来约束特征。这是一个直角坐标系的定义。

图 7-68 中的零件孔被公称尺寸和基准定义。两个公差控制框中的基准顺序相同，只有公差值不同。没有直径符号引用，因为公差带在这里已经变成两组互相垂直的平行面，在二维情况下可以看作是一个矩形。矩形公差带的中心在圆的理论轴线上。也可以引用一个垂直度控制，如图 7-69 所示。

图 7-69 中的垂直度约束了一个更小的公差带，目的是为了保证受控特征不会在不同方

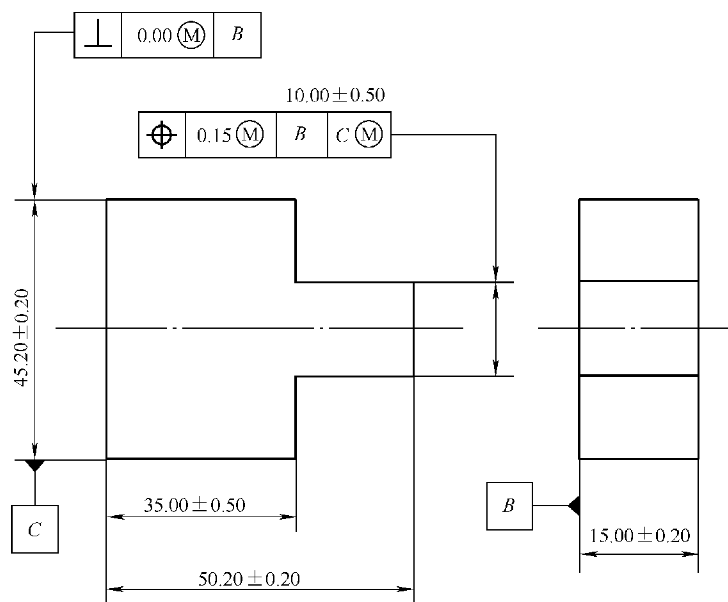


图 7-67　垂直度控制的对称特征

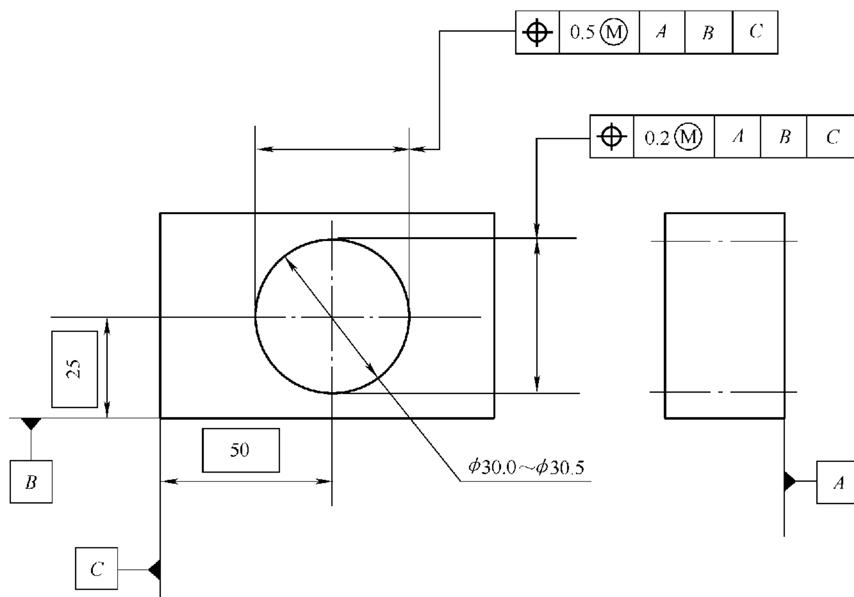


图 7-68　两个方向控制的特征定义

向上倾斜太大。为了保证这个控制，引用了垂直度圆柱面公差带。

极坐标方式的双向公差带不同于直角坐标系，如图 7-70 所示。

图 7-70 中的公差带分布如图 7-71 所示。

图 7-70 显示了一个半径为 20mm 的圆弧，圆心在基准轴 *B* 上。图 7-71 显示了图 7-70 中的公差带。图中一个公差控制框规定了 0. 2mm 宽的公差带，这个宽度等边分布在 *R*20mm



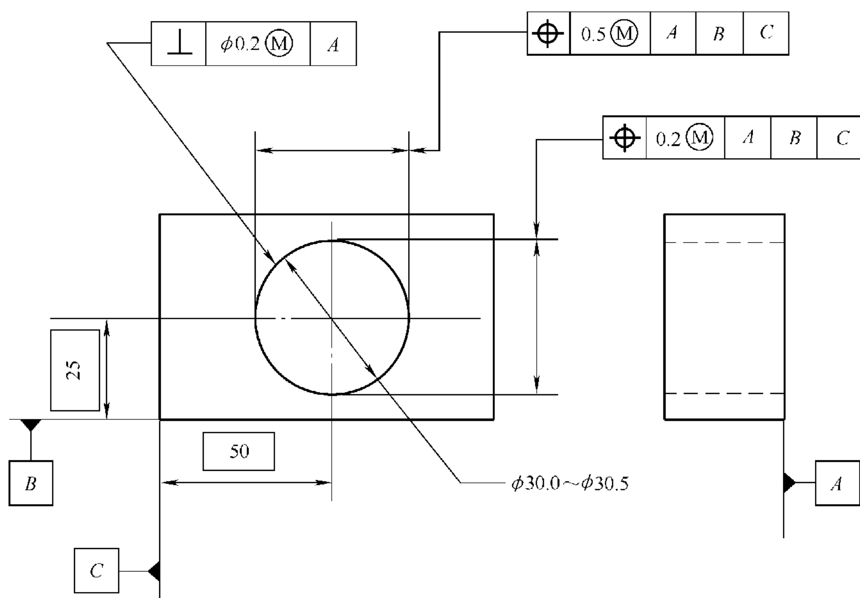


图 7-69　位置度控制实例

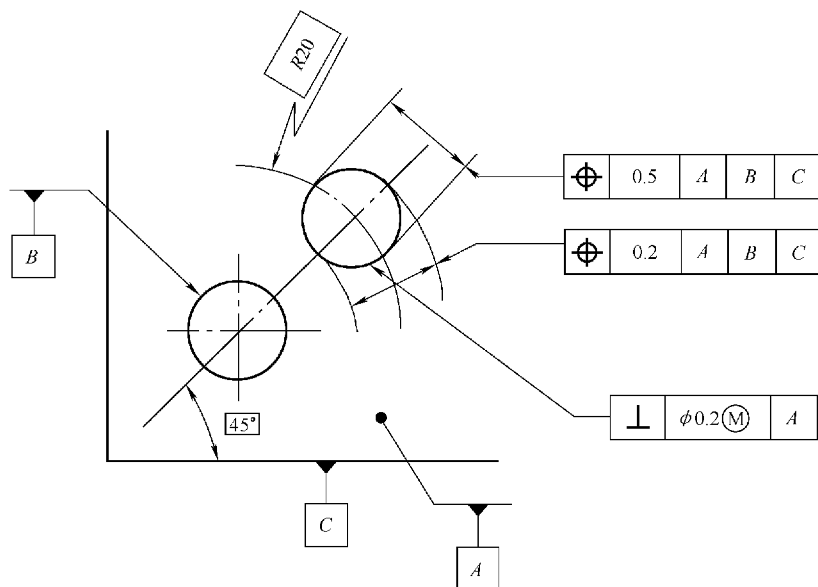


图 7-70　位置度控制圆形分布特征的定义

圆弧的两侧。相对于基准面 *C* 定向为 45°的平面与 *R*20mm 的圆弧面相交的线，定位了受控圆孔特征的轴线。公差带的两个平行面同时平行于同基准面 *C* 成 45°的中心面，平行面间距为 0.5mm，等边分布于中心面两侧。实际加工零件孔的轴线必须位于这个围成的公差带内。

垂直度控制更精确地约束了受控特征。这个垂直度的公差带为一个圆柱面，保证了受控特征在所有的方向上定向一致。这是一个非常实际的齿轮安装定义方式。

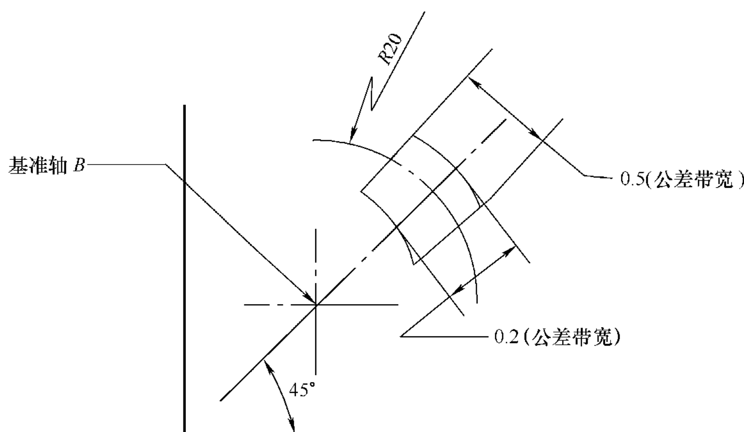


图7-71　位置度控制圆形分布特征的公差带

二十七、同步或独立要求

如果不止一个特征阵列使用公称尺寸和相同的基准特征定位，这些基准特征有相同的参考顺序，并且不是尺寸特征，那么这些特征阵列可以看作是一个阵列，可以使用相同设置的功能检具检验。这就意味着阵列特征内关系检测和阵列整体关系检测为同一次设置。但是如果主基准特征在主定位面（用来验证所有的特征）上不稳定（晃动），可重复性差，也能保证所有的阵列特征能够在相同的功能模拟下进行加工或检测。例如，一个有两个以上销钉阵列的匹配零件可以匹配到另一个孔板上。因此，多阵列可以看作是一个阵列。这种将零件上的多阵列特征当作一个阵列来处理的方式的公差控制比独立验证这些阵列控制更严。

如果被作为“独立要求”，这些同一个零件上的不同阵列可以在检验或加工时在不同方向上晃动（而不是同一个方向）。这当然增加了零件通过检验的机会，但是会导致某些零件不能同时匹配到另一个零件上。这些“独立要求”的零件适合那些独立的零件匹配于独立的阵列上的定义。对于被同样的材料符号修正的尺寸特征作为基准特征的情况，这个法则同样有效，如图7-72和图7-73所示。

被公称尺寸和相同顺序的基准定位的多阵列特征（图7-72），可以不考虑基准特征的尺寸，是平面特征，这些基准特征平面由各个特征面的高点建立。

图7-73所示是使用尺寸基准特征定位，使用相同的材料修正（MMC）定义多阵列特征的应用实例。

如果尺寸基准特征被MMC修正，相应的受控特征阵列可以浮动。如果尺寸基准特征尺寸偏离其MMC（当作为主定位时）或实效边界（当作为第二定位或第三定位时），受控的特征阵列作为一个整体可以偏离基准轴线或中心面一定的量。

如果因为相同的基准引用，给定同步要求，所有的阵列特征会作为一个整体浮动，方向和偏移量相同。所以匹配的销钉板可以适当地整体调整位置（偏离中心轴线或中心面），以便满足装配。如果这些阵列内的特征不是一个整体，而是独立要求，这些独立的阵列可以浮动在相反的方向上。这样会导致孔板和具有统一阵列销钉板的装配困难。

但是，如果孔阵列和不同的销钉板零件配合，作为一个整体的阵列的孔板的检测会太严



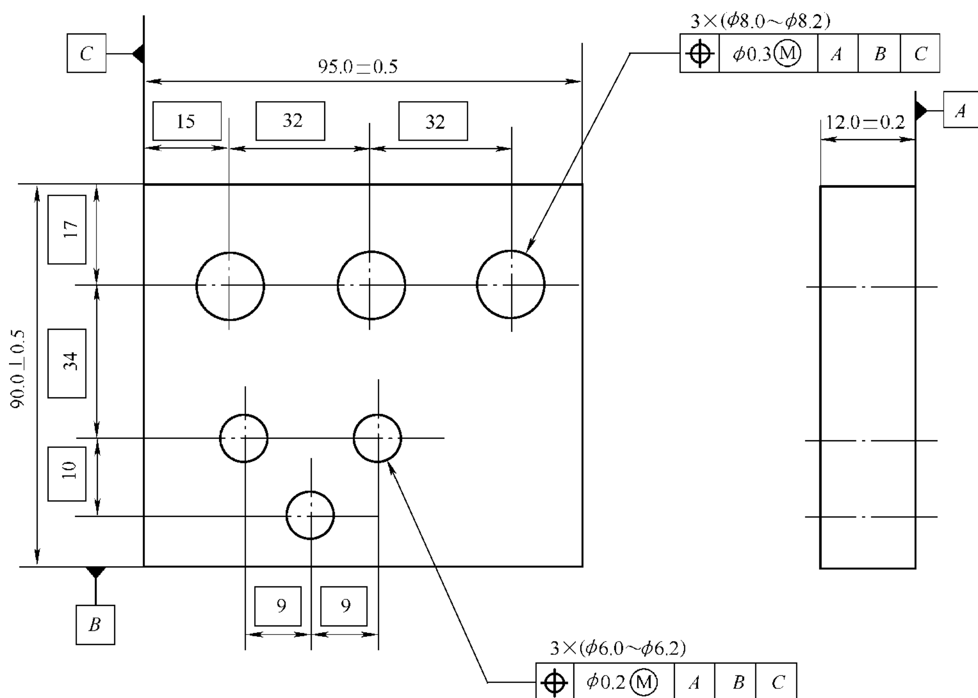


图 7-72　阵列特征的应用实例（RFS 修正基准）

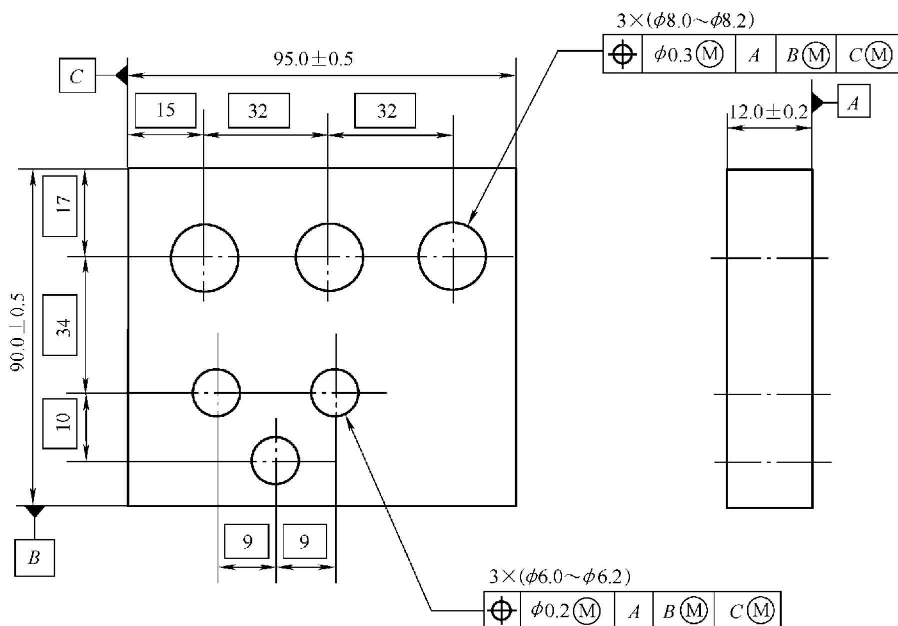


图 7-73　阵列特征的应用实例（MMC 修正基准）

格，导致能够装配的销钉板的孔板被拒收。如果不必要作为一个整体定义阵列，那么采用不同的基准顺序，在基准特征后面使用不同的材料修正符号可以实现这些阵列关系相互独立。

也可以在特征控制框下标注“独立要求”来取消这些阵列内在的相互关联，以减少零件通过检验的条件，接收更多的零件。

虽然同步要求隐含于这样的设置：多阵列通过公称尺寸和同样材料符号修正的基准（尺寸基准）、同样基准顺序进行定位。设计者也可以通过在公差控制框下标注“同步要求”来进一步强调。

对于一个组合公差控制框，本单元的内容只适用于第一组公差控制框，即基准 – 阵的控制，不适用于特征 – 特征的控制。换句话说，如果两个阵列的特征被组合公差控制框约束，这两个阵列特征可以作为一个整体验证基准 – 阵的约束，对于特征内的特征 – 特征关系，需要分别独立验证。

但是，如果需要对特征 – 特征的同步做要求，只需要在第二组公差控制框（特征 – 特征控制）标注特征的数量，以表示对于所有特征的同步要求，如图 7-74 所示。

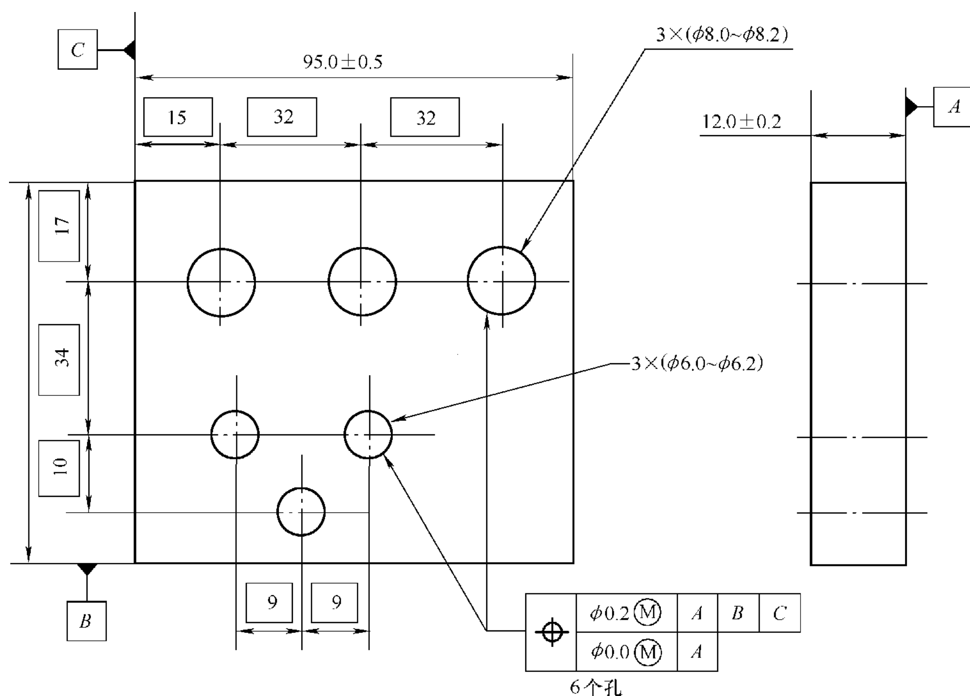


图 7-74　孔阵的另一种标注

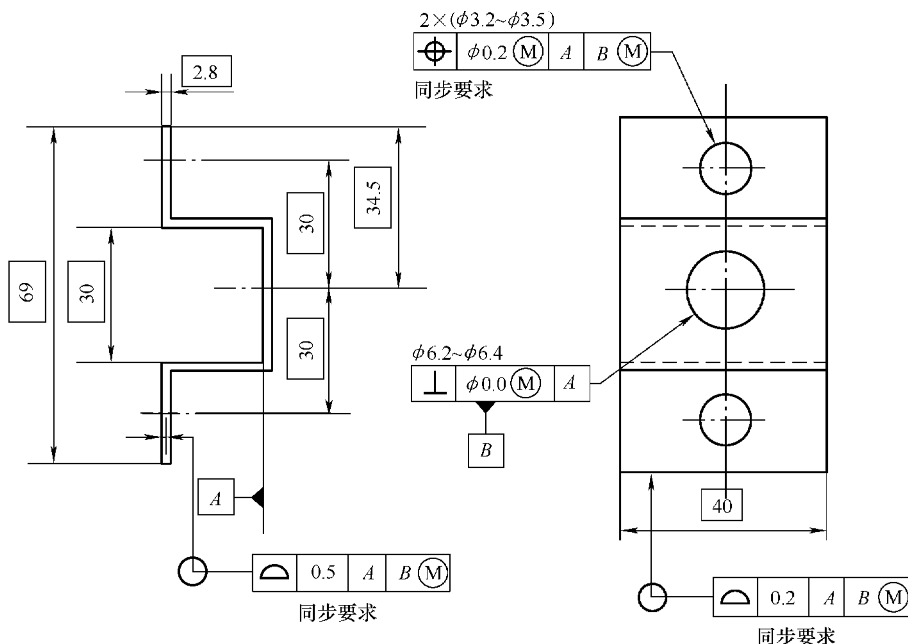
图 7-74 中的组合公差控制框中的两组公差框都被要求同步检验，在做阵内特征测量时，这两个孔阵被作为一个整体进行验证。这两个孔阵在图中被两根引线连到一个组合公差框上，并在组合公差框的下方注明了应用孔的数量。孔的尺寸被单独标示。

同步要求和检具测量声明了对于这两个孔阵用同样顺序的平面基准特征作为参考。两个孔阵之间的浮动不能超出基准 – 阵的公差（上组公差框），也要考虑阵内孔之间更小的公差要求（特征 – 特征）。如果设计者选择不使用注解，但是需要包括其他特征，推荐使用图 7-73中的标注方式。这六个孔不但被考虑为一个整体特征，也要求了特征 – 特征的同步验证要求。

在图 7-75 中，因为多个公差控制框中有同样的基准参考和引用顺序，所以同步要求被



创建。如果存在尺寸基准，那么这些公差框中的尺寸基准都应该使用相同的材料修正符号。也可以在公差控制框下方注解“同步要求”。所有这些“同步要求”的定义要求了相关特征被作为一个基准阵列验证。如果尺寸基准特征偏离 MMC（某些时候是实效边界），那么阵列内受控特征允许相应的浮动（偏移），但是所有的阵列内的特征必须作为一个整体，沿同一方向浮动。



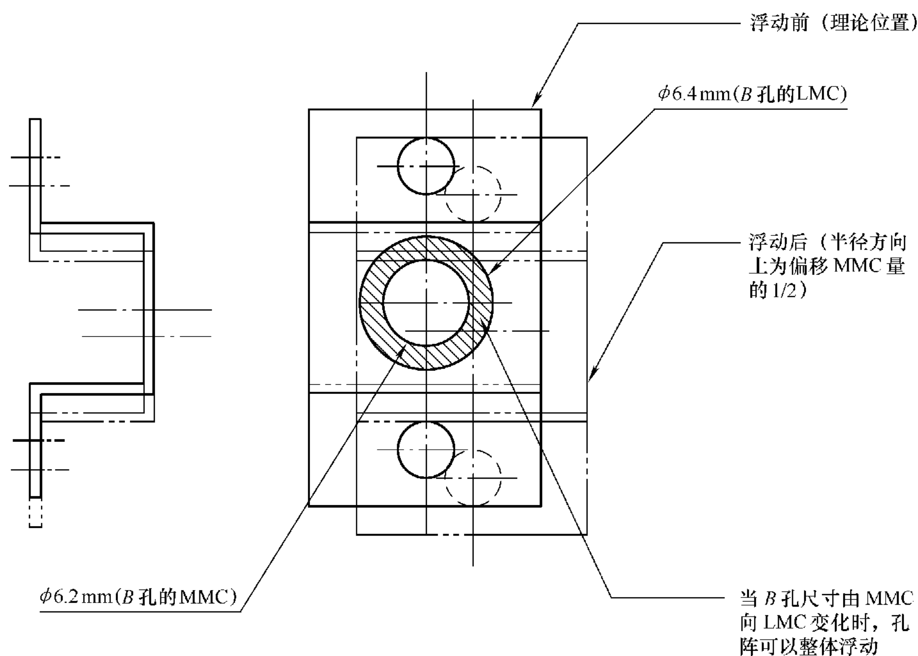
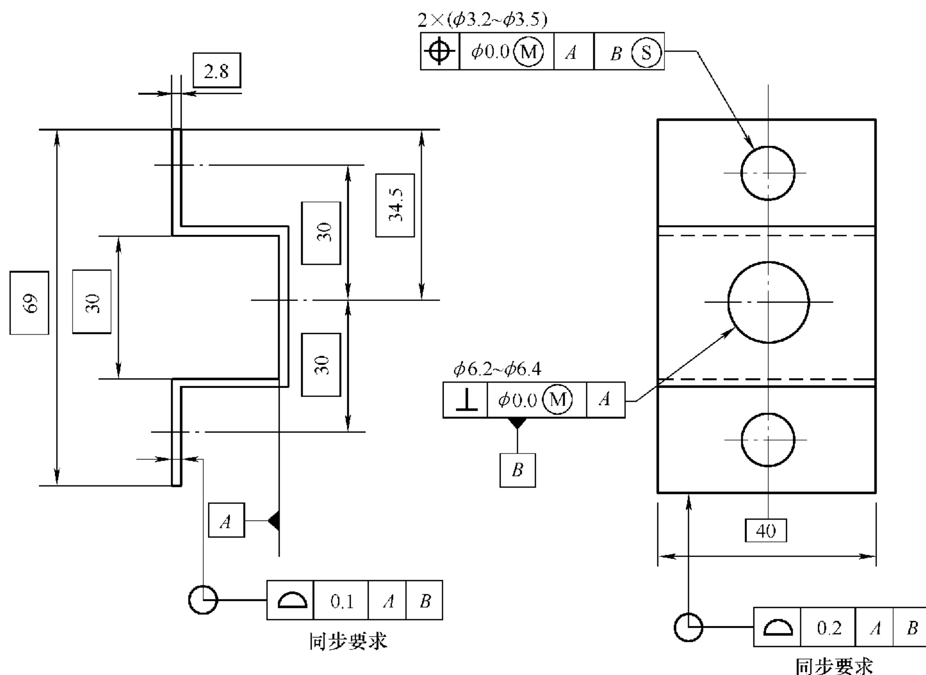


图 7-75　MMC 修正的零件定义及公差带

图 7-76 中，因为多个公差控制框中有同样的基准参考和引用顺序，所以同步要求被创建。如果存在尺寸基准，那么这些公差框中的尺寸基准都应该使用相同的材料修正符号，也可以在公差控制框下方注解“同步要求”。所有这些“同步要求”的定义要求了相关特征被



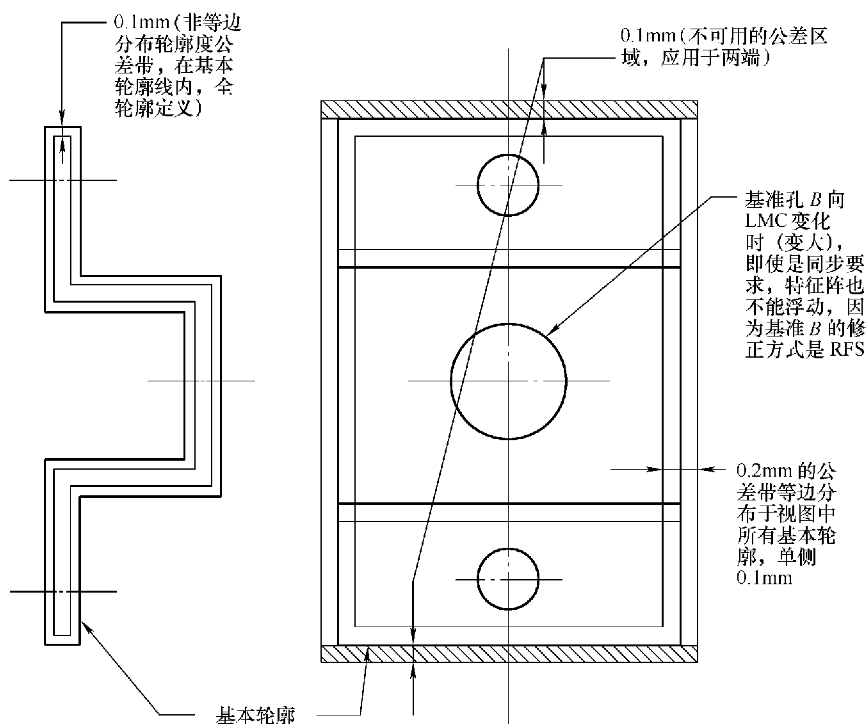


图 7-76　同步要求的定义及公差带



作为一个基准阵列验证。同步要求意味着相同的基准框架设置，所有的公差带测量同步验证。如果公差带包容在另一个公差带之内，多出来的公差带（两个公差带的交集多余部分）通常是无效的。

图 7-77 是关于同轴孔的定义。图中使用了组合公差框，有较大的基准－阵的公差带定义，较小的特征－特征公差带定义，特征为 MMC 时零同轴度公差定义。如图 7-77 中的孔，不再是连续的贯通孔，三个孔被指定为 Y，两个孔被指定为 X。一共有五个孔，并非三个。清楚了这一点，几何公差定义的程序就变得简单。

标示为 Y 的孔阵孔的实际加工尺寸为 MMC（ϕ9.0mm）时，可以在一个 ϕ0.5mm 的公差带内浮动，公差带由基准 *A*、*B* 和 *C* 定位。因为使用了 MMC 修正，所以当孔的尺寸由 MMC 向 LMC 变化时，这三个孔可以作为一个整体沿同一方浮动。同时要保证第二组公差控制框中的特征－特征（孔－孔）之间的约束，如果孔的尺寸为 MMC（ϕ9.0mm）时，孔和孔之间位置保持在 ϕ0.2mm 的公差带内。在第二组公差控制框中，对于基准 *A* 的垂直度也约束了一个更小的公差带。基准 *B* 没有重复出现，但是如果也引用在第二组公差控制框中，那么这个孔阵的旋转方向会被同时约束。

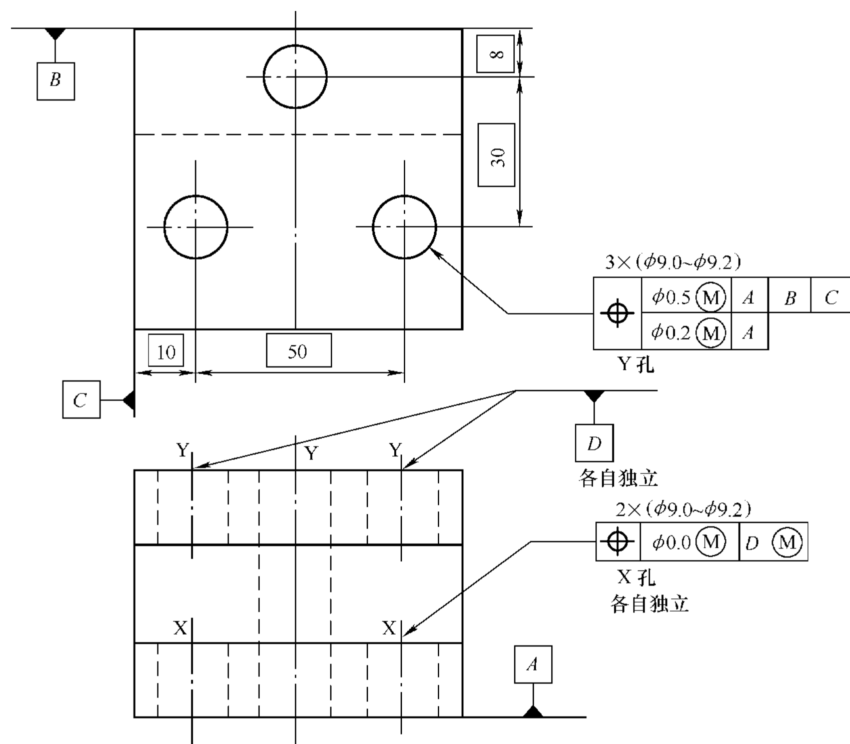


图 7-77　不连续特征的定义实例

两个 Y 孔也被定义为基准 *D*，分别独立地控制相应的特征孔 X。当基准孔 *D* 和 X 孔在 MMC 尺寸时，X 孔和基准轴线 *D* 被要求的同轴度公差为零。由于现实中不存在零公差，所以孔应该被加工为大于 MMC 的尺寸，以便对同轴度公差进行补偿。

二十八、位置度总结

位置度是一种位置公差控制，应用于尺寸特征的中心定位（如孔或轴特征的轴线定位，凸台或槽的中心面控制），其他的应用包括尺寸特征的定位、同轴特征、阵列特征控制等。像匹配件，如需要铆钉紧固的零件、导引销钉或那些需要将特征定位到一个规定范围的尺寸内紧固到一起的情况。根据 ASME Y14.5，位置度控制不仅保证了适当的装配，也允许了公差补偿，具有尺寸公差不具有的功能。保证装配并能提供公差补偿是加工厂最希望的一个结合。

并且在同心度的控制中能够了解到，位置度也能用来控制非旋转零件的同轴关系，在使用 MMC 修正时，只是简单的装配关系；在使用 LMC 修正时，应用于特殊的位置控制和壁厚控制；在使用 RFS 修正时，应用于同轴装配。

位置度控制的应用要素如下：

1）位置度公差的主要目的是定位尺寸特征的中心，如孔、销、凸台和凸缘。

2）位置度公差必须参考基准。

3）位置度公差能用来简单地定位同轴度控制和对称度控制。

4）位置度公差控制位置时，需要用公称尺寸来定义理想边界。

5）位置度公差使用 MMC 或 LMC 修正时，允许加工者进行公差补偿，且不会影响零件的功能。

6）位置度公差使用 MMC 修正时，可以使用属性检具检测。

7）位置度公差使用 RFS 修正时，不能使用属性检具，也不能应用公差补偿。

8）位置度公差不应用于一个尺寸特征的面或边定义，只应用于尺寸特征的中心定义。

在许多设计应用中，存在很多孔阵、销阵或一系列的匹配特征阵。阵特征在图样上可以有很多种定位方式。如果阵特征没有参考基准，那么控制框中的公差是表明阵中各特征的相互间的公差约束，而不是整个阵的位置公差。

特征阵的控制比单一特征的位置度控制复杂得多。因为不但要求控制整个阵特征的位置，这个控制也要求阵中各特征之间的位置关系，最终的目的就是要达到这些特征阵之间的装配关系。

以孔阵为例，每个孔都有独自的圆柱面位置公差带，由公称尺寸将这些圆柱面公差带定位。这样导致的一个问题是，没有测量的起始设置点。考虑这一点是因为孔的公差带之间是相互关联的。

另一个问题是，只有两种可以精确评估定位的方式：①属性检具；②数据图表分析（也称为图样检具）。三坐标有时会误判一个零件不合格，因为三坐标仅仅模拟孔在公差带内的情况。

第八章 如何逻辑定义零件公差

一、线性分段方式——曲轴子装配

线性分段方式是按顺序定义一个待匹配零件元素的方式。首先需要了解零件的基本装配信息，只考虑与待定义特征的相关的匹配特征，如果作为主装配零件，那么这个特征只能作为一个形状控制特征。

因为一个零件有时需要和几个零件装配，设计者就需要进行多个线性分段方式定义，不影响这个方式的应用原则。这些应用在一个零件上的分段方式也是有相互关系的，如同样的装配子零件、同样的基准或一个特征被定义为另一个特征的参考基准，那么这些定义是有发生顺序的。

线性分段方式的理想状态是定义的顺序和加工工艺顺序相同，这样既能能满足功能要求，加工这个零件的方式也将是最简易的。

图 8-1 所示是一个曲轴子装配图。需要注意这个零件的装配方式。假设这个装配只有这两个零件，第一步需要解决的是两个零件上基准的定义。按照基准的创建顺序，先创建主定位基准。完成这个步骤，要确认两个问题：①在这个总成中的装配面是哪些？②哪些面或特征起到配合零件的定向功能？

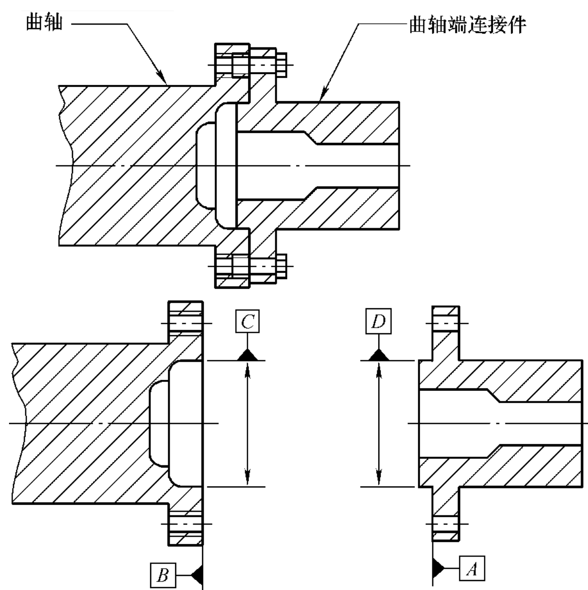


图 8-1 发动机曲轴及端盖

这两个问题很重要，因为如果一个需要至少三点接触的平面，并且在螺栓或轴销等紧固件去掉以后，起主要的承载作用，那么这个平面很有可能是一个期望的主定位基准面。当轴

或螺栓侧向紧固的时候，主定位基准能够起到零件的定向作用。至于这个定向是垂直度、平行度或倾斜度，这取决于选择的主定位基准特征。主定位特征有时起到了定位和定向的双重作用，不能混淆的是，主定位基准至少包含定向作用。

因此，需要详细研究图样，哪些面是必须接触的装配面，哪些是间隙配合或其他形式的配合面。从这个例子中可很明显地看出，中间的圆柱特征是一个间隙配合面，不能接触。因此这个圆柱面不能起到任何定向作用。有四个螺栓孔的平面是起定向作用的装配面，必须至少三点接触。将这两个零件上的对应装配面指定为主基准 *A* 和 *B*。这个步骤是定义这个配合体的首要步骤。定义完主基准后，约束了两个零件必须在这个主定位面上定向的倾斜度下旋转。如果不是这两个平面作为主定位基准，当这两个接触面少于三点接触，将不能保证零件的装配。将图 8-1 所示的总成分解为零件，确定初始装配尺寸和基准，如图 8-2 所示。

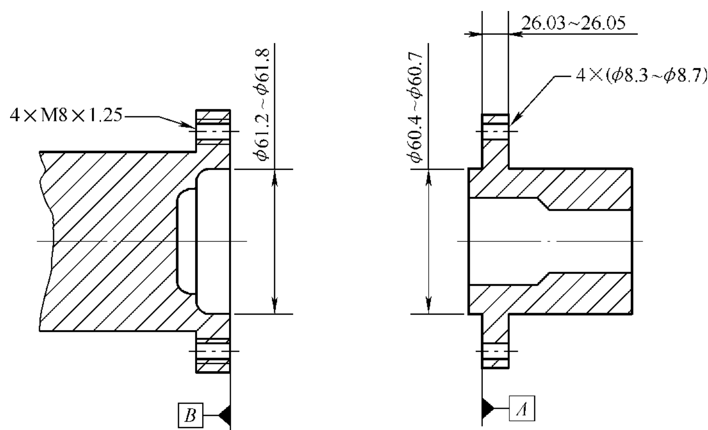


图 8-2　发动机曲轴及端盖的尺寸定义

这两个装配面相互定向为一定的倾斜度，试想一下，如果不是三点接触，从配合缝隙中可以看到螺栓的螺纹。如果增大螺栓的扭矩来闭合这个缝隙，那么会导致这个装配上的螺栓受力不均匀，后果是疲劳断裂。如果使用 *A* 面和 *B* 面作为主定位面，保证它们至少三点接触，那么这个问题就可以避免。

对于这两个主定位面，另一个要求是装配状态下的稳定性（不能摇晃）。满足这个要求需要用形状公差定义这些面。按照几何公差法则一，主基准面 *A* 有一个尺寸公差默认来控制其平面度（同时对于相对面的形面控制）。基准面 *A* 必须在 26. 03 ~26. 05mm 之间，即平面度公差为 0. 02mm。

如果这个尺寸公差给出的公差带不能满足这个装配的定向要求，需要指定一个更紧的配合公差使这个装配可靠地定向，这样能使后续的几何公差定义可重复性更好。现在需要比 0. 02mm 更小的公差带，一种方式是简单地加严这个主定位面和相对面之间的尺寸公差。但这种方式比独立定义 *A* 面平面度的方式成本高。

公差的赋予需要考虑加工成本和实际的装配效果，所以设计者需要和加工者沟通，了解加工特征平面度的能力和成本，平衡加工成本和零件的功能性。在这个例子里，假设平衡成本和功能后的平面度公差是 0. 02mm，并且将这个公差赋予主定位面 *A* 和 *B*。

一般主定位面确定后，需要选择第二和第三定位基准。第二基准特征应该是能够起到定



位功能的平面或轴线。第二定位基准应该是功能性的，起到对齐或匹配的作用。这个例子中的圆柱面轴线能够满足这个要求。指定这两个基准特征为 *C* 和 *D*。基准特征 *D* 配合入基准特征 *C*。

基准特征 *C* 和 *D* 是一对配合特征。对于基准 *D* 的约束一定是形状控制。按照几何公差控制法则一，图中基准 *D* 已经存在一个形状约束。即当基准特征 *D* 的实际加工尺寸为 ϕ60.7mm（MMC）时，特征 *D* 必需的圆度、直线度和锥度是零公差。对于 *D* 的匹配特征 *C* 在 ϕ61.2mm（MMC）的时候，情况相同。在形状控制的约束下，两个特征在理想尺寸时的配合尺寸控制已经足够保证配合，不需要格外的定义。

因此，必须另寻适当的定义方式。因为是基准定义阶段，不可能使用位置度、同心度或跳动的控制方式。只有基准 *A* 创建先于基准 *D*，基准 *D* 才需要基于基准 *A* 创建。它们之间的关系是倾斜度约束关系，不是位置关系。这个倾斜度关系是简单的基准特征 *D* 形成的轴线和基准特征 *A* 形成的面的垂直关系。所以建立基准特征 *D* 和基准面 *A* 的垂直控制。

图 8-3 所示的控制方式可以解读为：当特征 *D* 的实际加工尺寸为最大实体尺寸时，轴线相对于基准面 *A* 的垂直度为 ϕ0.25mm，或特征 *D* 安装在 *A* 面上的圆柱面垂直度在 ϕ0.25mm 之内。公差计算来自于特征 *D* 和 *C* 的最大实体材料尺寸相减，所得的几何公差平分给两个配合特征。如果实际加工中，一个特征的垂直度加工比较困难，那么尽量将公差分配给这个特征，这时合理分配公差可以降低成本。在这个例子里，假设两个特征的加工难度相等，平均分配公差，所以公差 0.5mm 的一半 0.25mm 赋予基准 *D*。接着解决基准 *C* 的公差设置，同基准 *D* 的定义方式相同，即基准 *C* 是垂直于基准 *B* 的垂直度控制。

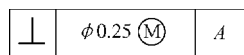


图 8-3　基准特征 *D* 的定义

至此，主、次定位基准都已经选择和定义完全，接着需要判断是否需要更多的基准辅助这两个零件的定义。这里定义尺寸公差的目的仅仅是满足曲轴能和匹配件通过紧固件配合到一起。因此，只剩下螺栓孔的定义。如果这些螺栓孔相对于现有的基准定义足够满足除相对于特征 *B* 和 *C* 的轴的旋转自由度的约束，那么就不需要继续指定第三基准。因为这两个零件没有像键槽一样的特别区分位置的特征，所以现有的基准定义足够满足这两个零件的定义。基准特征的定义如图 8-4 所示。

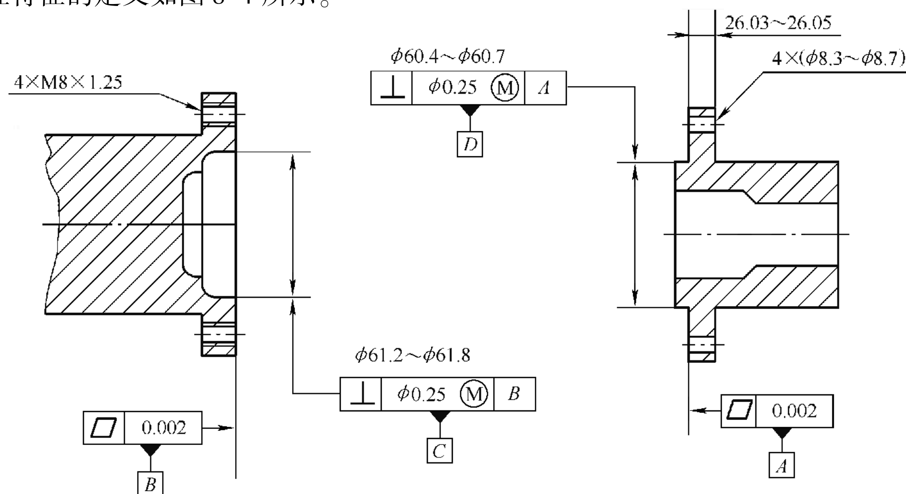


图 8-4　基准特征的定义

在完成螺栓孔定义之前，必须明确以下控制：

1）在基准面 *A* 和 *B* 上的平面度控制允许这些安装面配合时不发生过度的晃动。

2）基准特征 *C* 和 *D* 的垂直度控制能够保证 *D* 插入 *C*。前提条件是基准面 *A* 和 *B* 配合时不发生过度晃动。

现在，为了能够将两个零件紧固到一起，必须先将螺栓的分布圆定义为一个基本直径，然后在分布圆上定义孔和孔之间的位置关系，利用现有的中心基准 *C* 或 *D*，通过基本位置尺寸定义这些螺栓孔的位置，然后螺栓孔可以基于这些基准框架给出公差。在开始之前，必须了解间隙孔的公差。四个 ϕ8.3 ~ ϕ8.7mm 的孔需要一个相对于基准面 *A* 的倾斜度公差和相对于基准 *D* 的距离公差。

几何公差控制中的同心度和跳动是对受控孔的轴线和基准 *D* 的轴线同轴的定义，所以这两个控制都不适合。基准 *D* 的轴线和抽象的螺栓孔分布圆的轴线同轴，但这个分布圆不适合给出几何公差约束。公差是对实际特征进行约束的。这里孔和孔距基准轴 *D* 的距离是实际存在的，可以作为公差约束对象。而螺栓孔分布圆是一个想象的圆，由公称尺寸定义直径。将要对螺栓孔阵创建的公差控制框定义了允许的偏离理想倾斜度公差和位置度公差。

位置度是强大的几何公差定义工具，足够满足相对于当前基准的倾斜度控制和距离控制，比其他几何公差控制工具都更为合适。因此，这里引用位置度。如图 8-5 所示，可以描述为：当零件放置在基准面 *A* 上，并且螺栓孔阵的中心同轴于基准轴线 *C*，并且可绕轴线 *B* 旋转时的螺栓孔的位置度。或者解释为：当配合尺寸为最大实体尺寸，垂直于基准面 *A* 且定位于基准轴线 *D*（与轴 *D* 的尺寸无关原则）时，螺栓孔的轴线允许的位置度。

对于匹配特征，曲轴上的螺栓孔阵，可使用相同的控制方式。所以 M8 螺栓孔阵的控制方式如图 8-6 所示。

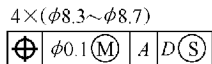


图 8-5　端盖的孔阵定义

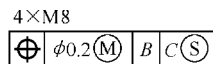


图 8-6　曲轴的螺纹孔定义

间隙孔（MMC）= 8.3

− 螺纹孔（MMC）= 8.0

总的几何公差 = 0.3

公差分配后：

间隙孔 = 0.1

螺纹孔 = 0.2

因为螺纹孔的自对中性，所以不能得到等量的尺寸公差补偿。虽然当螺栓节圆直径缩小，螺纹孔的节圆直径变大的情况下，存在一定的公差补偿，但微乎其微且很难数量化。因此，螺纹孔相对于间隙孔在这一点上是不利的。因此应将更多的公差赋予螺纹孔。即

这个螺纹孔的位置度公差带是一个圆柱面，并且分布在零件外侧，即为延伸公差的应用。这个圆柱面公差带的长度等于螺栓没有拧入螺纹孔的长度。因为螺栓的头部在配合零件的法兰上，所以法兰厚度就是延伸公差的最小厚度，即 26.5mm（MMC）。所以最终的图样标注如图 8-7 所示。

评价好的图样是从图样的易读性开始的，就如一个地图，有起始点和终点，在起始和终点之间有连接的线路指导如何到达一样。在阅读的时候，一个控制点直接导引你到下一个控



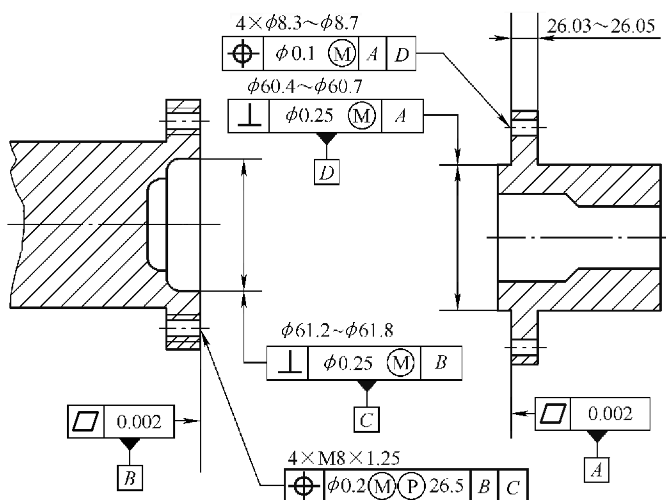


图 8-7　发动机曲轴与端盖的公差控制定义

制点，直到整个产品的定义完成。如果确认当前步骤已经完成，那么就可以自然而然地进行下一步骤的定义。

二、成本与几何公差控制

基于功能性定义一个零件的方式会导致加工困难，成本昂贵。这个问题可以通过以下两个步骤来避免：

1）在创建功能性约束时，对于任何特征关联所有的基准特征的约束，尽量选用相等的公差带。

2）去掉不必要的有紧公差约束的关系。有时两个约束的成本低于一个约束。

图 8-8 所示总成图显示两个零件装配在一个需要标注尺寸的零件上。基准特征已经被指定。这些选定的基准有的很好，有的不理想。以下将尝试如何区分匹配上的这些相关基准的紧公差约束，而将宽松的公差赋予那些次要的装配特征上。在完成这个目标之前，必须初始定义这个零件，然后进行优化。

首先假设加工者接收的零件毛坯是一个铸件。零件上用作安装面的表面会首先被车削，然后用来稳定零件作为加工其他特征的基准面。研究一下其他两个零件如何安装在这个零件上，判断哪些是主要安装面。这些主要安装面就是需要的主定位面，应该尽可能作为第一道工序加工。例如这个零件，一个为安装面 *B*，另一个为安装面 *A*。如果需要加工这两个面，必须对这两个面给出几何公差控制，以便传达这些信息给加工者。

同样地，必须确认是否希望隐含一个加工顺序。如果这两个主要接触面没有加工先后的要求，基准面 *A* 和 *B* 必须赋予一个平面度控制，并且它们需要共同遵循标题栏中的垂直度的统一要求。但是如果需要有加工先后的要求，这两个基准特征中的一个（或者 *A*，或者 *B*）会首先被赋予一个平面度的控制，另一个基准会垂直于这个先定义平面度的基准面。在这个例子，赋予基准面 *A* 一个平面度控制，使基准面 *B* 垂直于基准面 *A*。即使加工者有一定的优化加工的改动范围，但这个符号一旦出现在图样上，即规定了加工的顺序，不再在加工者优化范围内。

首先加工基准面 *A*，然后基准面 *B* 以垂直于 *A* 面的关系加工。

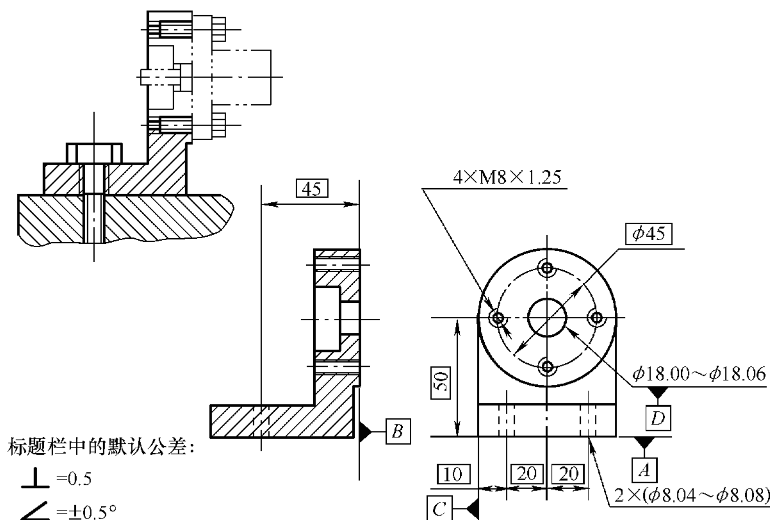


图 8-8　基座的零件实例

接下来确认下道加工工序。因为基准特征 *C* 不是任何一个零件的装配面，故不需要加工，也不需要给出公差控制框。在标题栏中的默认公差：在没有其他规定的时候，所有的倾斜度在正负多少度内。所以在初始的零件设置中，不会加工一个铸件的毛坯表面，如基准面 *C*。并且在后续的设置中把它作为一个测量基点，会导致意想不到的错误。所以按照第二步骤，紧公差不会应用到这个基准特征上。

基准特征 *D* 是中心孔，对于一个匹配件的装配起到很重要的作用。由于 4 个螺纹孔阵与装配直接关联，并且以基准 *D* 为测量基准，因此下一步应定义基准孔 *D*。通常在产品定义中有几种选择，一种是以外部特征定义内部特征，另一种是以内部特征定义外部特征。在这个例子中，两种方式都使用。流程是先由外部基准面定义基准孔 *D*，再由基准孔 *D* 定义 4 个螺纹孔。可以看出，只是把重点放在安装特征 *D* 和螺纹孔上。这个任务完成之后，再考虑两个间隙孔和相关于 *A* 基准面的定义。

图 8-8 中对基准孔 *D* 的定义只是一个粗略的设置，这里将基准孔 *D* 约束完全。位置度约束允许使用相对于基准的倾斜度和位置定义。定义的公差带是一个圆柱面，意义是当匹配件安装在基准面 *B* 上时，保证中心孔的匹配。并且将这个圆柱面公差带粗略地定位到基准面 *B* 和 *C* 上。既然基准特征 *B* 是加工面，而基准特征 *C* 不是一个加工面，所以应尽可能将基准 *C* 放在后面，故基准特征 *C* 最合适作为第三基准，只需要一个最高点的接触。几何公差控制框如图 8-9 所示。

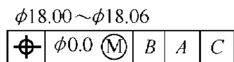


图 8-9　基准 D 的定义

由零位置度公差可知，插入基准特征 *D* 的配合零件的轴的实效边界是 φ18.00mm。这只是一个初始定义，后续的步骤还要对这个设置重新定义更严的公差。对于基准特征 *D* 的定义需要清楚的一点是，基准特征 *D* 只能引用在基准 *D* 之前定义的特征，而不是那些之后参考基准 *D* 定义的特征。对于加严约束，不同的基准特征会有不同的公差宽泛或加严要求。

在这个例子中，应用直径为 1.5mm 的公差带作为与受控特征功能相对无关紧要的基准



约束。增大公差的目的是降低成本，提高特征的可加工性并保证壁厚。这些目标的实现需要计算，以保证零件的完整性和壁厚。最小壁厚的计算在以前的章节讨论过，这里不再做讨论。最小壁厚计算的公式可以反推出最大的公差要求。

初始的几何公差控制意义：孔的实际加工尺寸是最大实体材料尺寸，垂直于基准 *B*，定位于基准面 *A* 和 *C*。由于最大实体材料符号通常应用于匹配特征，当孔尺寸变大、轴尺寸缩小时，零件更容易装配，但零件也更偏离理想尺寸。如果 MMC 修正符号同位置度符号配合使用，即为一个匹配特征。

在这个例子中，由于需要定位中心孔，这个控制可以解读为：匹配中心孔特征的位置定位。配合基准可以进一步解读为：当零件安装在基准面 *D* 上，定位于基准面 *A* 和 *B* 上，其匹配中心孔的位置度。公差修正方式是首先使用 $\phi 1.5$mm 的公差带宽松定位，然后修正相对重要的几何公差约束（在这个例子中使用位置制度公差，MMC 原则），如图 8-10 所示。

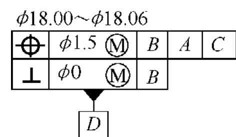


图 8-10　基准 *D* 定义的优化

本步骤定义中，和装配相关匹配零件的基准特征 *D* 唯一相关的是基准特征 *B*。因此，它们之间是唯一需要紧公差配合约束的，即 MMC 时为零位置度约束。因为 *D* 和 *B* 之间是垂直关系，所以垂直度是一个合适的公差控制方式。可以描述为：当零件安装于基准面 *B* 上，中心孔实际加工尺寸为 MMC 时，中心孔的垂直度为零。基准特征 *D* 已经定义过，这一步是优化这个定义。下一步可以开始 4 个螺纹孔的定义，其方式和本步骤相似。

4 个螺纹孔阵如果定义完成，那么就可以实现两个装配件中的一个零件的装配。4 个螺纹孔必须保证内部的相互关系（在 $\phi 45$mm 的分布圆上的位置关系）和螺纹孔阵同参考基准的整体关系，所以使用位置度控制的方式。这些螺纹孔是圆形的，需要圆柱面公差带约束轴线位置。因此直径符号也会被引用到特征控制框中。

这些受控的轴线由实际匹配的螺纹节圆形成，虽然所获得的补偿公差有限，很难数量化，但是存在的补偿公差还是对装配有益的，因此使用 MMC 修正。配合零件放置在基准面 *B* 上，因此所有的面中，基准面 *B* 需要最多的接触面积。

实现这个最大接触面积的要求就是将基准面 *B* 设置为主定位面。4 孔阵直接关联基准特征 *D*，所以必须保证与基准特征 *D* 的关系，以实现装配。因此，基准特征 *D* 被作为 4 孔阵的测量基点，确定 *X* 和 *Y* 方向上的关系。换句话说，基准特征 *D* 会作为第二基准特征，4 孔阵会从基准特征 *D* 产生的两个正交面定义位置。在基准特征 *B* 和 *D* 的框架下，三个相互垂直面被创建出来。但是由于其中两个面是中心孔的轴线产生的，因此这两个面只相互定向和定向于基准面 *B*。如果需要约束 4 孔阵的旋转自由度，即以规定的倾斜度公差（通常出自于标题栏）绕基准轴线 *D* 旋转，必须参考第三个基准。

第三基准特征会形成一个面，这个面对基准轴线 *D* 产生的两个面定向，结果是，4 孔阵以基准轴线 *D* 的两个相交面作为测量的起点。第三基准的作用就是限制孔阵的旋转。在给定的基准特征中，*A* 或 *C* 都可以被选择为第三基准，用于限制孔阵的旋转。但是 *A* 作为一个加工面，相比 *C*，平面度更好，具有更好的可重复性，应该更合适作为第三基准。孔阵并不是以基准面 *A* 作为测量基点的，而是基准轴线 *D* 的两个正交面，两个正交面又垂直于基准面 *B* 并与基准面 *A* 成一定的倾斜度。基准特征 *D* 是一个尺寸基准特征，与 4 个螺纹孔阵同步满足装配要求（为同一个匹配零件上的特征），可以使用 MMC 修正。这意味着当基准孔

D 尺寸变大并垂直于基准面 *B* 时，4 孔阵作为一个整体可以得到一个相应的浮动量。

当基准 *D* 尺寸变大，孔阵得到的浮动量也意味着等量的基准 *D* 偏离基准面 *B* 的垂直度。所以严格地讲，4 孔阵偏离基准轴线 *D* 的浮动量来自于特征 *D* 的实效包容边界（ϕ18mm 的圆柱面，垂直于基准面 *B*）。因此给出控制的初始定义如图 8-11 所示（假设配合零件上的间隙孔尺寸为 ϕ8.4 ~ ϕ8.7mm）。

ϕ0.02mm 的公差带来自于配合件的最大实体尺寸同螺栓最大实体尺寸的间隙差的一半。由于匹配零件上间隙孔的最大实体尺寸是 ϕ8.4mm，而螺栓的最大实体尺寸是 ϕ8mm，螺栓孔和间隙孔平分公差余量 ϕ0.04mm。在本例中，平分公差，各自为 ϕ0.02mm。然而，因为间隙孔可以获得一等一的公差补偿，所以多数情况下超过半数的公差分配给螺纹孔。虽然螺纹孔的公差控制框中有符号Ⓜ修正公差值，由于螺纹孔的自对中效果，抵消了大部分补偿公差。在和间隙孔的公差分配中，螺纹孔通常需要不止一半的可用公差量，以实现螺纹孔的可加工性。对于间隙孔，在这种情况下对于补偿公差的应用不具有优势。

这个圆柱面公差带不在零件材料内部，而是延伸到零件上一定的高度，取决于螺栓装配后在 *B* 面上的高度，即装配件的厚度。这里假设零件的最大厚度是 15.5mm。为实现这个控制，新的公差控制框如图 8-12 所示。

4×M8

⌖	ϕ0.02 Ⓜ	*B*	*D* Ⓜ	*A*

图 8-11　曲轴上螺纹孔阵的定义

4×M8

⌖	ϕ0.02 ⓂⓅ15.5	*B*	*D* Ⓜ	*A*

图 8-12　曲轴的螺纹孔阵定义的完善（延伸公差）

这个公差框可以有很多的解读方式。例如：如果螺纹孔的节圆实际加工尺寸为最大实体尺寸，螺纹孔的节圆轴线的相互位置度公差为 ϕ0.02mm，公差带延伸到基准面 *B* 上的高度为 15.5mm，并垂直于基准面 *B*；公差带定位于基准轴 *D*，如果基准轴 *D* 的实际加工尺寸为最大实体尺寸，那么螺纹孔阵的整体浮动为零；这个孔阵定向于基准面 *A*。配合零件放置在基准面 *B* 上，销轴插入基准特征 *D* 内，间隙孔对齐螺纹孔，同基准面 *A* 没有关联。如果允许旋转螺纹孔阵，也不会影响零件的功能。如果不参考基准 *A*，螺纹孔阵相对于基准面 *A* 的关系可以被图样标题栏中的通用倾斜度公差替代约束。公差定义的关键是确定哪些是紧公差要求和哪些是宽松公差要求。

如果需要确定一个特定的公差量，可以由独立组合公差控制框来实现。假设经过计算，允许相对于基准 *A* 的旋转公差为 ϕ1mm，其他关系保持不变，可以得到如图 8-13 所示的公差控制框。

4×M8

⌖	ϕ1 ⓂⓅ 15.5	*B*	*D* Ⓜ	*A*
⌖	ϕ0.02 ⓂⓅ 15.5	*B*	*D* Ⓜ	

图 8-13　曲轴上螺纹孔阵定义的优化

在组合公差控制框中，第一组的公差控制框中的基准顺序非常重要。如果没有前面的来自于基准 *D* 的 *X* 和 *Y* 向位置定位，一个约束旋转自由度的基准 *A* 很可能被误认为定位基准。4 个孔阵现在可以整体绕基准轴线 *D* 在一个静态的 ϕ1mm 的公差带内旋转，但是不能超越它们之间的内部相互位置关系，以及与基准 *B* 和基准 *D* 的关系。这个控制现在得到了优化，能够实现功能和成本降低。从这个控制可以看出，两个几何公差控制不一定比一个几何公差控制成本高。

现在需要完成下一个任务，即另一个匹配件的装配。这个装配中两个间隙孔将两个零件紧固到一起。间隙孔 ϕ8.04 ~ ϕ8.08mm 必须保证 40mm 的间距，并且垂直于安装面 *A*。这两



个间隙孔孔阵需要相关一些基准来定义，开始可各分配一半的可用公差到两个零件上。还是假设紧固件是一个 ϕ8. 00mm 的螺栓，那么一半的可用公差为 ϕ0. 02mm。同定义螺纹孔阵时一样，分配更多的公差给螺纹孔，这样也会减少间隙孔的补偿公差。计算好公差后，可以得到如图 8-14 所示的初始定义的公差控制框。

2×(ϕ8.04～ϕ8.08)

⌖	ϕ0.02 Ⓜ	A	B	C	

a)

2×(ϕ8.04～ϕ8.08)

⌖	ϕ0.02 Ⓜ	A	B	D Ⓜ

b)

2×(ϕ8.04～ϕ8.08)

⌖	ϕ0.02 Ⓜ	A	B	D Ⓢ

c)

图 8-14　间隙孔的三种定义方式

对基准 *C* 和 *D* 的选择比较困难。在这一步的定义中，基准 *C* 没有参考的必要，因为本公差控制框中的紧公差要求，而且铸件的表面粗糙度值大，上面的高点的可重复性很差。虽然基准特征 *D* 没有表面粗糙度问题，如果引用的话，就意味着将两个间隙孔定中心于基准轴线 *D*。定中心可能很难实现并且需要夹具的夹持（至少减慢了操作速度）。由于两个间隙孔和基准特征 *D* 没有关联，所以这些操作显得多余。两个间隙孔和基准 *C* 也没有什么关联，但是如果使用基准 *B*，仅仅需要一个挡块就可以实现 *B* 面的高点模拟。但是要记住的是，由于铸件的表面粗糙度值大，在加工和测量的阶段中，这些高点会不同，可重复性很差。如果引用基准 *D*，可以使用 MMC 或 RFS 修正。

虽然正确的定义应该是 RFS 修正的 *D*，但基准孔 *D* 的尺寸同两个间隙孔的位置无关。在使用 RFS 修正之前，要清楚：MMC 修正会影响零件的功能么？在这个例子中，基准特征 *D* 使用 MMC 修正后，允许两个间隙孔有一个浮动的量，最大为孔 *D* 实际尺寸变化的一半。由于孔 *D* 尺寸公差很小（ϕ0. 06mm），两个间隙孔的最大浮动量为 0. 03mm，不会影响零件的壁厚。对于成本的节省也不显著，但如果是使用 MMC 而不是 RFS 修正方式，则检具和夹具可能更简单。

综合考虑所有的可能选择，选择 *B* 而不是 *D*，是因为在下一步的优化控制中，能够去除相关于 *B* 的紧公差约束，替换为一个自由公差。因此使用控制：当零件放置在 *A* 面上，并且两个间隙孔定位于基准 *B* 和 *C*，间隙孔的位置度公差为 ϕ0. 02mm。

很明显，因为需要最大的接触面积，基准 *A* 是主定位面。选择基准 *B* 而不是基准 *C*，是因为基准 *B* 是加工面，有更好的可重复性，而基准 *C* 不具备这些特点。同样地，这个控制可以允许宽松的公差给不重要的关系，紧公差赋予重要的关系。匹配零件直接和两个间隙孔和基准面 *A* 关联，没有直接接触或对齐于基准 *B* 和 *C*。因此公差关系在 *B* 和 *C* 上可以放宽。假设经过计算，当间隙孔的尺寸为 ϕ8. 04mm，壁厚和另一些因素允许的公差为 ϕ1mm 时，可以得到如图 8-15 所示的控制框。

这个组合公差控制框中，下组公差中的位置度符号是很重要的，垂直度不能实现 40mm 的孔间距控制。所以下组公差控制框可以解读为：间隙孔的实际加工尺寸为 MMC，并垂直于 *A* 面，两个间隙孔之间的位置度为 ϕ0. 02mm。在这个公差控制框的约束下，实际加工的零件，虽然一些零件破坏了零件的尺寸限定，但是仍然能够满足装配。所以，需要进一步优化这个控制，以便能够满足 M8 螺栓装配，位置度公差为 ϕ0. 02mm，间隙孔的最小尺寸为 ϕ8. 02mm。最终控制如图 8-16 所示。

2×(ϕ8.04～ϕ8.08)

⌖	ϕ1 Ⓜ	A	B	C
⌖	ϕ0.02 Ⓜ	A		

图 8-15　间隙孔的特征间约束

2×(ϕ8.02～ϕ8.08)

⌖	ϕ0.98 Ⓜ	A	B	C
⌖	ϕ0 Ⓜ	A		

图 8-16　间隙孔的零位置度定义

这个优化后的公差控制的好处是保证了和图 8-15 一样的壁厚和同样的匹配边界，但是允许更多的零件通过检验。这样达到了降低成本的目的。如果孔的加工尺寸是 ϕ8.04mm（图 8-14 中的 MMC），位置度的补偿公差会恢复到原先的 ϕ1mm 和 ϕ0.02mm。所以这个控制保持了原来的匹配和壁厚的技术要求，但是扩大了可接收零件的范围。基座的最终定义如图 8-17 所示。

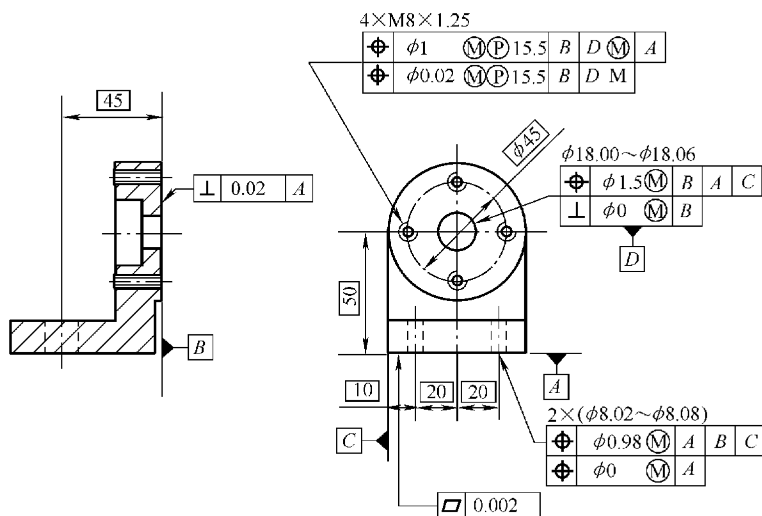


图 8-17　基座的最终定义

第九章　几何公差控制——跳动控制

圆跳动是一个二维几何公差控制，是对一个特征相对一个轴的圆度和同轴度公差控制方式。如果应用在一个与基准轴线成90°角的面上，圆跳动能够控制这个面的摆动（即能够将质量绕基准轴线均布）。圆跳动探测360°圆线元素，每个线元素独立检验。

全跳动是三维公差控制，用来检验特征面相对于基准轴线的成形面（平面、锥面或圆柱面）和同轴度。如果应用在一个与基准轴成90°角的面上，全跳动可以控制平面度和面对轴的垂直度。检测时，特征面绕基准轴旋转，指示器探针沿着受控面滑动，最终的FIM读数不应超出公差控制框中的公差值。

跳动控制是面对基准轴的控制，没有MMC或LMC的修正，公差控制框中不应出现MMC或LMC修正的符号，需要至少引用一个基准，公差控制框中不能有直径符号ϕ。

跳动是一个功能很强大的公差控制，由于跳动公差的设置模拟了车床的加工设置，在加工设备上就可以进行检验，省略了二次设置，另外对于检具也很容易设置。跳动可以完成平面度、圆度、位置度的同等公差控制能力，极力建议使用。

某些几何形状的误差会影响旋转部件的功能，这种情况是振动越小越好。旋转零件的振动导致了噪声，经常过早失效，如电机的转子轴。通常这种振动是由于旋转零件的动平衡差导致的。这种动平衡差是由于围绕旋转轴的质量分布不均匀导致的。几何控制上的原因有：圆度误差、同心度误差或垂直度误差。跳动控制可综合控制这三方面的误差。

第一节　圆跳动的定义、应用及检测方法

一、圆跳动的定义

跳动控制同轮廓度控制一样，有两种不同的约束方式。圆跳动是一种面特征的圆元素的二维几何公差控制。圆跳动复合了特征的圆度和同轴度控制。如果特征面与基准轴线成90°（如端面），可以控制这个面的摆动。

圆跳动是一种受控面参考基准轴的控制，需要一个以上的参考基准。圆跳动因为均匀分配零件的绕轴质量，所以通常用于有旋转功能的零件，进行平衡或同心度控制。

圆跳动使用基准、复合基准或主定位、次定位基准建立或定向基准轴线。受控特征绕基准轴线做360°旋转。一个带读数的千分表的探针与被测特征面接触，建立每个断面的FIM测量。如果受控特征符合尺寸公差要求，在每一个断面上的FIM读数不超出公差框中的公差值，那么这个特征符合要求。

作为主定位，基准轴线通常由基准特征的最小圆柱面的拟合中心线建立。如果没有其他规定，圆柱面特征的尺寸约束一个圆柱面特征的圆跳动、受控面的直线度和锥度。如果需要定义圆跳动控制的公差带比尺寸公差的公差带窄，则取代尺寸公差，由圆柱度公差来约束受控面的圆度。因为受控面定中心于轴线，所以圆跳动能很好地控制旋转零件的质量平衡分布。

通常认为，圆跳动比同心度更容易检测，并且比在MMC修正下的位置度的平衡控制更好。但由于圆度要求的需要，被圆跳动定义的零件（有中心和位置度定义）通常被认为加工更困难，成本更高昂。操作圆跳动测量时，FIM读数在每个断面上的线元素（做360°旋转）同公差控制框中的公差值比较，每个线元素的测量时读数器都要归零。

这些圆跳动的每一个公差带都有各自径向的圆度偏差值，同轴度定义的零件允许拟合中心线上的点偏离基准轴线，偏移量为同轴度公差控制框中的公差值的一半。而对于圆跳动，检测者不需要清楚这些，只要记录下圆跳动的偏差。如果FIM读数超出规定的圆跳动公差值，那么零件不合格。如果在公差规定的范围内，则接收零件。

二、圆跳动的应用

图9-1所示是一个圆跳动的控制例子。

圆跳动控制的特征面是一个圆柱面，基准*A*是一条轴线。圆跳动的检测如图9-2所示。

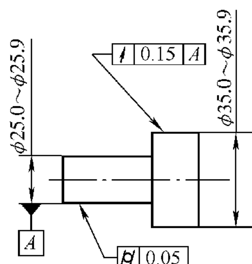


图9-1　圆跳动的控制例子

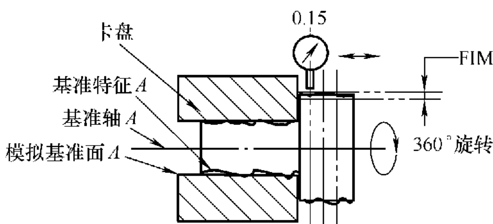


图9-2　圆跳动的检测

1）受控面半径方向上的圆度偏差是0.15mm。这个受控面上不允许有深度超过0.15mm的坑，没有高于0.15mm的凸点，且整体相对于基准轴线倾斜不能超出0.15mm。检测可以使用千分表测得每个圆元素直径方向上的相对点偏差在0.30mm之内。应注意的是，尺寸特征必须优先满足，执行尺寸不相关原则，需要遵循几何公差法则一的要求。

2）拟合中心线上的每一个点必须在半径方向上相对于基准轴线不超出0.05mm，直径方向上不超出0.10mm。

3）圆度和同心度要求必须同时满足公差要求。

对于圆柱度和圆跳动，尺寸公差优先独立确认。在静止状态下（无旋转），受控特征必须满足MMC要求。换句话说，就是每个特征必须首先满足尺寸约束，不能超出MMC。每一个截面的相对点上直径方向的值也不能小于LMC约束，然后再确认是否在跳动公差控制内。

圆跳动公差不应用MMC或LMC条件修正。跳动公差总是应用尺寸不相关原则（RFS）。跳动公差可以大于或小于特征的尺寸公差。如果需要更严的公差要求，受控特征可以由圆度或全跳动进一步修正。如果比尺寸公差的要求公差宽松，尺寸公差会接管控制成形，跳动控制将特征定中心于基准轴线。

圆跳动的应用要素如下：

1）圆跳动至少需要一个基准，即旋转的基准轴。

2）圆跳动检测时，每个圆元素独立设置。

3）圆跳动内在同时完成了对特征面的圆度和同心度控制，这两种几何误差的累积效果



被视为面到轴的关系。

4）圆跳动应用 RFS。

5）圆跳动及应用于截面为圆的圆度和同心度的特征控制，如锥面。这种情况在测量时，探针要和锥面垂直。

三、V 形架的检测方式探讨

V 形架检测基准外径特征的跳动、同心度和另一些应用的方式已经被沿用很多年了，当然这种方式还有待商榷。检测者应该熟悉 V 形架检测的局限和可能导致的错误。首先，从倾斜度来讲，V 形架直接接触一个圆柱面直径的两条直线，为了测量的可重复性，图样会要求成一定倾斜度的基准线，用 V 形架来模拟这个基准特征，这种情况很少见，V 形架在工业中的检测很常见。最重要的是要清楚，当使用 V 形架时，基准的外径必须达到规定的精度，以便于 V 形架的两条接触线形成的中线与这个直径的中心线同轴。

对于一个外部的面特征参考一个内径基准特征的轴线，最好是用一个检具销钉插入基准孔来建立一个检测时可以用来旋转的轴线。然后选择使用卡盘或 V 形架来建立旋转的中心线。对于卡盘，中心线会自动建立。对于 V 形架，需要找到一个能最大配合入内径的检具销。

图 9-3 中给出了圆跳动可以控制的面。跳动只能应用于 RFS 条件，不能用 MMC 或 LMC 修正。

当测量圆跳动时，指针必须在每个测量的起始点复位到零，并且每一个测量的圆元素是完全独立地比照给定的跳动公差值。在这个例子中，圆跳动能够用来鉴别特征的二维摆动（定向控制）和表面（形状控制），但不是三维面的整个轮廓和面的摆动。

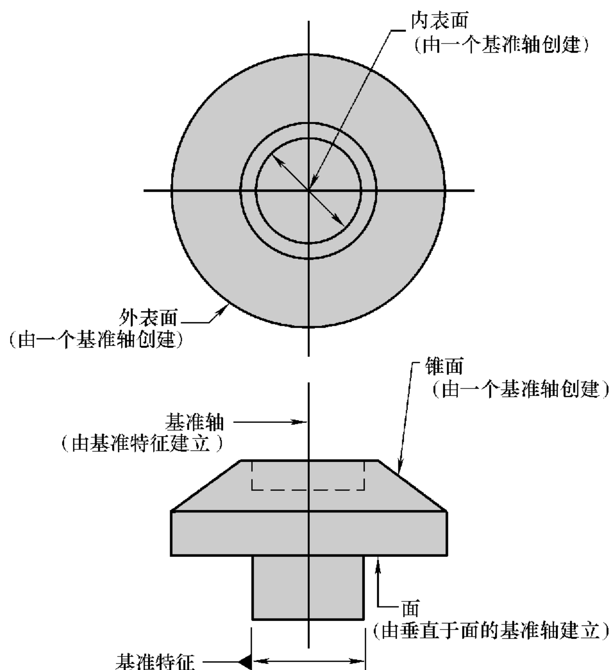


图 9-3　圆跳动可以控制的面

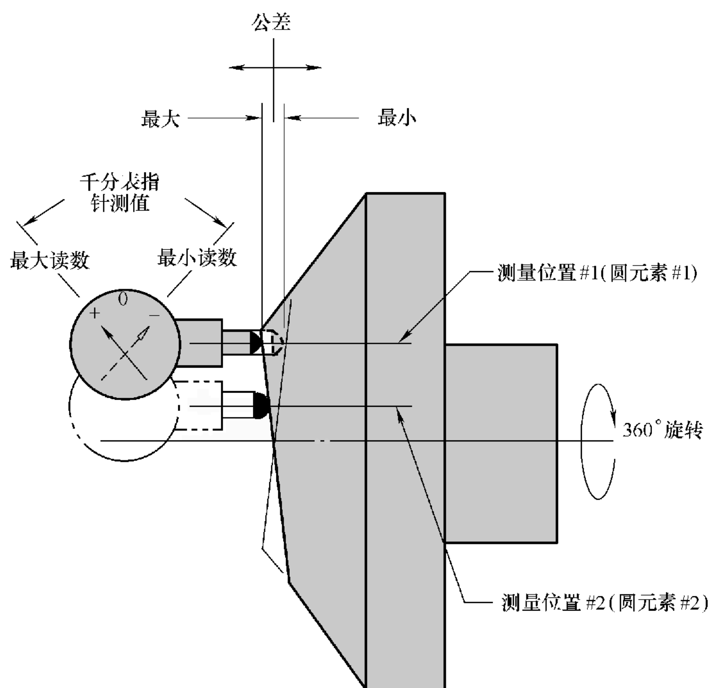


图 9-3　圆跳动可以控制的面（续）

四、锥面到轴的控制应用

圆跳动只控制二维圆线元素（它们同心或同轴），这个圆线元素可以是锥面上的。对于整个特征面的控制完全是另外一种控制方法。

锥面上的每一个独立的圆元素的公差带等于固定且垂直于理想锥面的千分表读数，测量时锥面绕基准轴做360°转动，在特征面上每一个测量位置相互独立，互相不影响，也就是说，每次测量都需要重新复位。

图 9-4 中，基准轴 *A* 的最小包围面创建了零件的旋转基准轴线 *A*，零件绕基准轴线旋转。如果基准特征 *A* 的圆柱面特征偏差较大，使用 V 形架会导致基准轴线 *A* 的不稳定，造成测量结果不准确。带读数的千分表垂直于锥面特征，FIM 输出读数不能超过 0. 75mm。

五、垂直于基准轴的面的控制应用

如图 9-5 所示，圆跳动仅控制这个平面的二维方向上的圆元素，而不是整个平面，也就是说要在每次圆元素测量开始时，复位千分表。

每一个独立圆元素的公差带等于千分表的读数，千分表垂直固定于这个理想的垂直面，这个特征面随零件绕基准轴做360°转动，沿特征面分布的这些圆元素的公差相互独立。

在图 9-5 中，基准特征面 *A* 的最小包围面创建基准轴线 *A*（这个最小圆柱面和基准特征上的高点接触），零件绕基准做360°旋转，带读数的千分表垂直接触于待测端面（每次在起始点将千分表复位归零）。FIM 输出读数不能大于 0. 75mm。



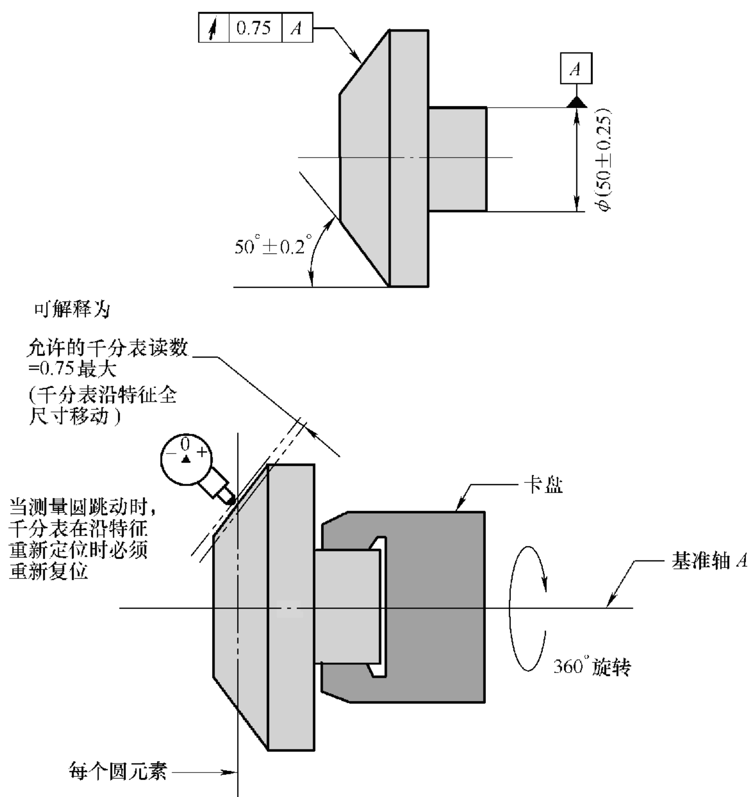


图 9-4　圆跳动对于锥面到轴的控制及检测设置

六、同轴于基准轴的面的控制应用

任何独立圆元素的公差带等于千分表的读数，千分表沿特征每测一个圆元素需要重新定位，千分表的指针垂直于理想的特征面，每次测量零件绕基准轴旋转 360°。公差控制的是每一个圆元素。

如图 9-6 所示，圆跳动仅仅控制了这个面特征上的二维圆元素，而非整个特征面。圆柱面基准特征 *A* 的最小包围面创建基准轴线 *A*，零件绕基准轴 *A* 旋转，每次在起始点注意复位千分表。FIM 输出读数不能大于 0. 75mm。

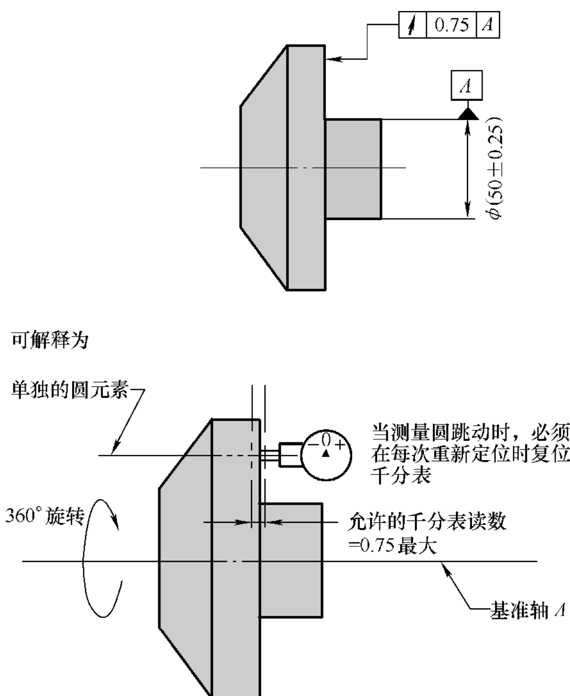


图 9-5　圆跳动对于面的控制及检测设置

七、复合基准轴的测量（中心孔方式）

每一个独立圆元素的公差带范围等于千分表的读数，千分表垂直固定于理论特征面上，且零件绕轴线旋转 360°。

跳动公差独立应用于每一个独立的圆元素。

面向对基准面和轴的跳动控制。

如图 9-7 所示，公差带由两个径向差为 0.75mm 的圆柱面组成，并且这个柱面同轴于复合基准轴线 *A*—*B*。基准轴可以由两个同轴的中心孔创建，这个中心孔要确保同轴以减少测量误差。零件绕复合基准轴线 *A*—*B* 旋转，带读数的千分表垂直接触零件表面，沿纬线方向滑动，注意每次测量要先复位千分表。FIM 读数输出不能大于 0.75mm。

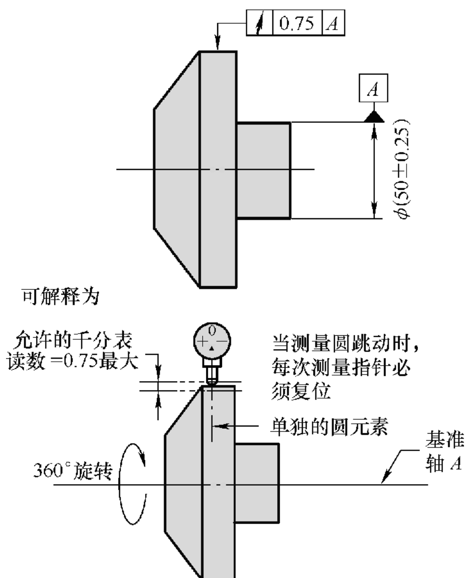


图 9-6　圆跳动对于面的控制及检测设置

八、两个基准的方式

图 9-8 所示是圆跳动参考两个基准的情况，端面的摇摆和垂直度得到约束，测量的结果是端面的摇摆和垂直的综合结果。

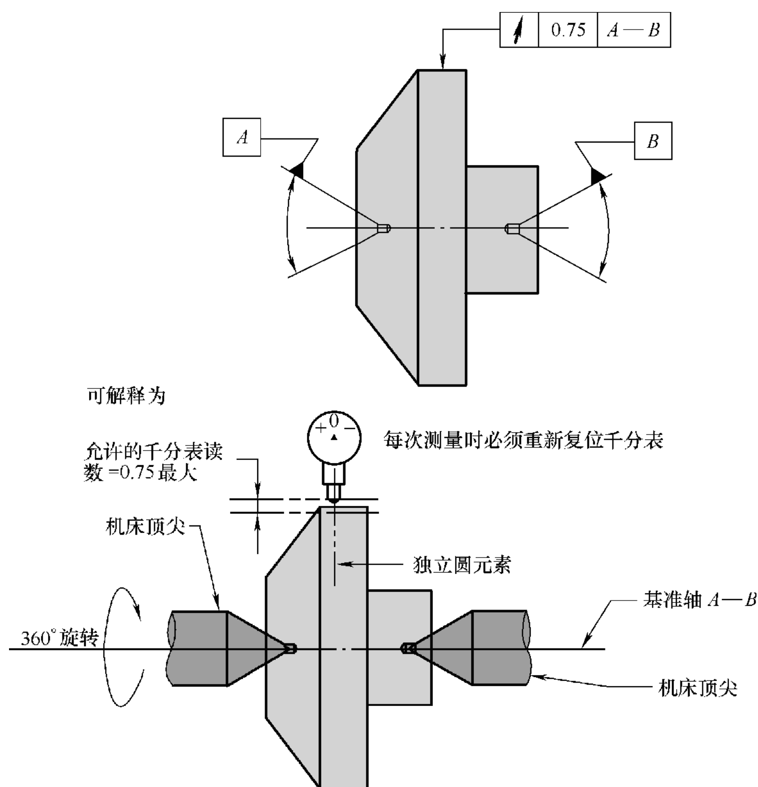


图 9-7　复合基准与圆跳动的应用及检测

零件先在基准特征面 *A* 上创建基准特征面 *A*（与 *A* 面上至少三个最高点接触的平面），基于基准特征 *A*（垂直于基准特征面 *A*）卡紧特征圆柱面 *B*（与圆柱面 *B* 上至少两个高点接触），将零件定位。然后旋转零件，在 *A* 和 *B* 组成的基准框架中，待测端面的圆跳动不能超出 0.75mm。



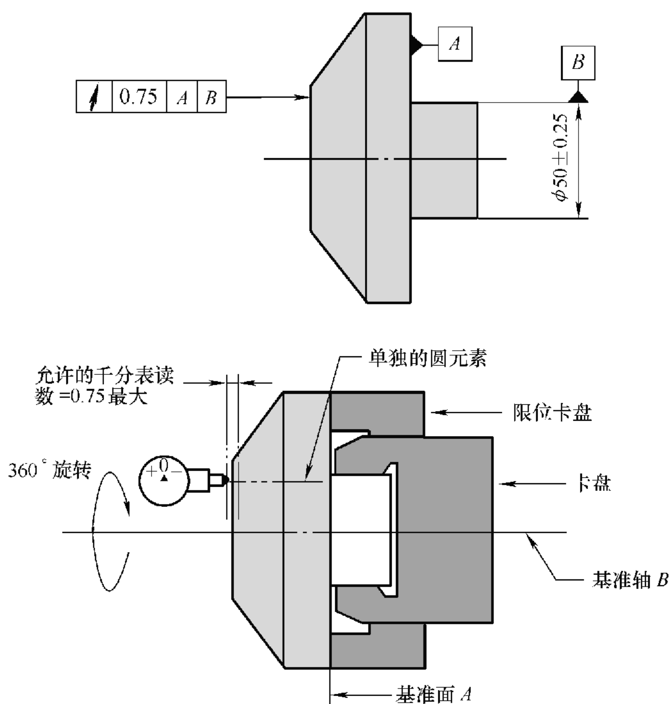


图 9-8　两个基准下的圆跳动及检测设置

第二节　全跳动的定义、应用及检测方法

一、全跳动的定义

全跳动是一种旋转零件的复合控制，能够约束三维面特征，需要至少一个参考基准。全跳动综合了旋转特征的圆度、同心度、直线度、锥度和零件的面轮廓度的控制。当全跳动用来控制一个旋转特征的端面（特征面垂直于特征轴线的情况），它又综合控制了这个端面的摆动、垂直度和平面度。全跳动通常用于高速旋转的零件的平衡和振动，以及一些质量分布的问题。全跳动和圆跳动的主要区别是，全跳动检测的是面，而圆跳动检测的是圆元素。

全跳动建立基准轴线的方式同圆跳动。不同的是，全跳动检测时，特征面绕基准轴线做360°旋转，FIM 的读数是整个特征面的值。当千分表的探针接触特征面，受控特征面旋转360°时，千分表的探针沿特征面的长度方向即纬线滑动。全跳动能够用来约束整个特征面或部分特征面。如果全跳动控制面的一部分，需要定义公称尺寸来定位这个独立要求的特征面的位置。

如果两个特征面相关于一个共同的基准轴线，这两个特征面之间的公差值在各自允许的相对于基准轴的公差值的和之内。

如果全跳动用作同轴度控制，特征面对于基准轴线的控制可以归结为圆柱度和同心度控制。这比圆跳动有更严的公差要求。对于这样的圆柱面特征，在尺寸公差带大于跳动公差带时，像桶形、腰形或锥形特征可以通过圆跳动的检验；因为对面是一个整体的要求，全跳动

检验会要求面的直线度和锥度而拒收这样形态的特征面。全跳动对于特征面的控制比圆跳动更严格，全跳动和圆跳动对于特征面的定中心要求相同。

全跳动如前所述，做FIM检测。全跳动与圆跳动不同，圆跳动将特征面看作由独立的圆线元素组成，每个线元素有独立的公差带。全跳动将特征面作为一个三维特征面，所有特征面上的线元素必须同时位于一个公差带内。圆跳动创建了一个同圆度一样的公差带，每一个断面上的公差带是一个同心圆环，区别是多了一个定中心于一个基准轴的约束。全跳动创建的公差带像圆柱度，为两个同轴的圆柱面，区别是多了一个定中心于一个基准轴的约束。

如果没有其他要求，受控特征必须先满足尺寸约束。即特征整体不超出MMC的要求，每一个断面直径方向上的相对点的尺寸不能超出LMC的要求。但是这个尺寸控制是独立于全跳动优先验证的。

因为受控面对基准轴的定中心效应，全跳动被认为是一种有效地控制旋转零件转动平衡的方式。全跳动被认为是比圆跳动更难以检验（对于紧公差）和一种成本更高的加工方式。但是，有时候，因为全跳动对成形控制更严，可以得到期望的有效的功能约束。

全跳动公差允许受控理想圆柱面特征在公差控制框中规定的公差值范围内有一定偏差。同轴度控制允许拟合中心线上的点偏离于基准轴公差控制框中公差值一半的量。检测者只需要将千分表的探针沿纬线从头到尾地滑动，记录下360°内的FIM，如果FIM超出公差控制框中的值，受控特征即为不合格。

二、全跳动的应用

图9-9所示为全跳动的定义实例。在这个例子中，全跳动控制的是一个圆柱面的直径特征，基准轴 *A* 是一条轴线。

受控圆柱面特征在径向公差在0.15mm之内（单边）。这个圆柱面上的凹点不能深于0.15mm，凸点不能超出0.15mm，锥度不能超出0.15mm，面的直线度在0.15mm之内。然而，直径方向上的相对点在整个面上的测量（游标卡尺）的偏差范围在0.30mm之内。

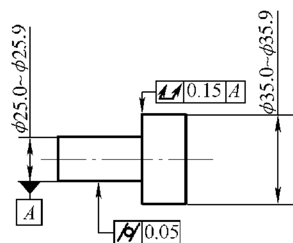


图9-9　全跳动的定义实例

另外，必须注意直径方向上给出的尺寸公差的进一步加严约束只能通过这种方式实现。如果尺寸约束更加宽松，那么一些公差形状，如面的锥度变差会在尺寸公差范围内符合要求，但是不符合全跳动的要求。

这个受控面拟合中心线上的点的控制必须在基准轴线的公差范围0.05mm内。

对圆柱度和同心度的要求必须同时满足规定的公差范围。

三、锥面到基准轴的控制应用

在图9-10中，基准轴 *A* 的最小包围面创建了零件的旋转基准轴线 *A*，零件绕基准轴线旋转。如果基准特征 *A* 的圆柱面特征偏差较大，使用V形架会导致基准轴线 *A* 的不稳定，造成测量结果不准确。带读数的千分表垂直于锥面特征，FIM输出读数不能超过0.75mm。千分表只在起始点复位一次。



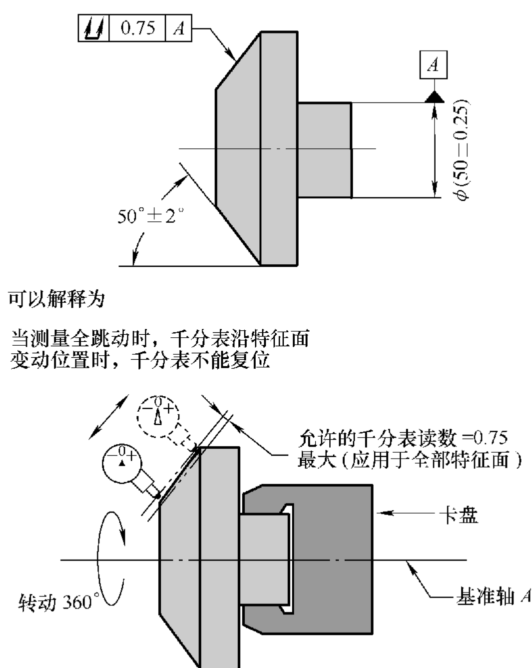


图 9-10　全跳动对锥面的控制及检测设置

四、垂直于基准轴的面的控制应用

如图 9-11 所示，圆跳动仅控制这个端面的一部分，这个被定义的整个平面作为一个整体测量，千分表只做一次复位设置。

在图 9-11 中，基准特征面 *A* 的最小包围面创建基准轴线 *A*（这个最小圆柱面和基准特征上的高点接触），零件绕基准做 360°旋转，带读数的千分表垂直接触于待测端面。FIM 输出读数不能大于 0.75mm。这个测量同时检验了这个面的平面度和垂直于基准轴 *A* 的垂直度。

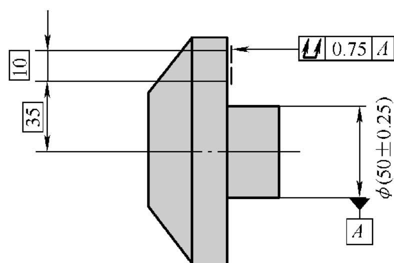


图 9-11　全跳动对端面的定义

图 9-12 所示是一种通过全跳动检测零件端面平面度和垂直度的方法。基准特征 *A* 应该卡紧在一个最小圆柱面内（与圆柱面特征 *A* 的高点接触）。零件做 360°旋转，读数千分表在由公称尺寸定位的 10mm 区域内划过（可能是特殊装配或密封的原因）输出 FIM 读数。这个读数不能超出 0.75mm。

五、全跳动的测量

图 9-13 所示是全跳动验证的设置方式。

在图 9-14 中，零件基准 *B* 由主定位基准特征面 *B* 上至少 3 点接触的面建立。第二基准特征 *A* 用来构建基准轴 *A*，由基准特征圆柱面 *A* 的实际最小外切面构建，且在理想状态下垂

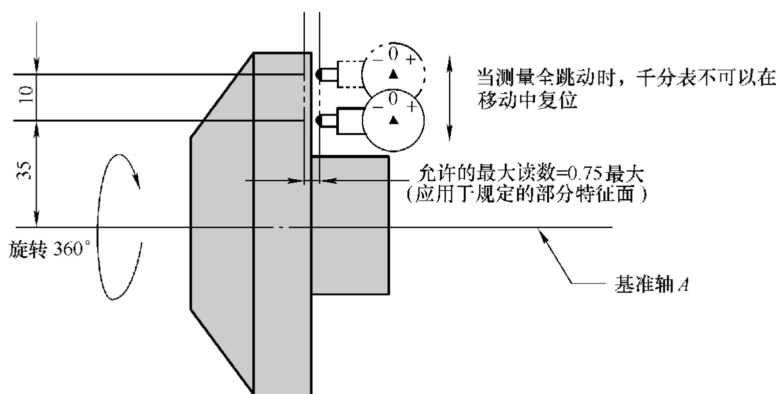


图 9-12　全跳动对于端面的控制的检测设置

直于基准面 B。然后带读数的千分表的探针和受控特征面接触。零件绕基准轴 A 做 360°旋转。FIM 读数不能超出特征公差控制框中的公差值。圆跳动控制的特征面上圆线元素做独立的验证，全跳动控制的面必须作为一个整体验证，FIM 读数不能超出公差框中的公差值。

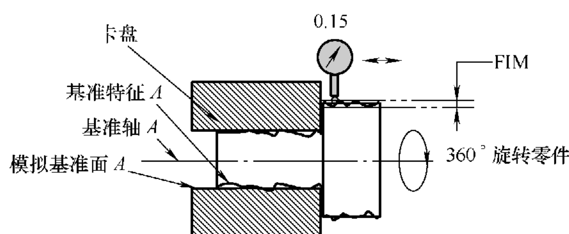


图 9-13　全跳动验证的设置方式

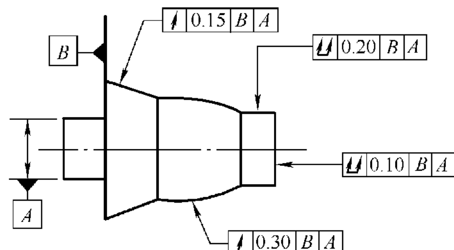


图 9-14　一个零件的跳动控制定义

图 9-15 显示了圆跳动控制一个面相对于一条基准轴线的圆度和同轴度。基准轴由两个同轴的基准特征面建立。这个圆跳动控制的特征面由无限多个圆线元素组成。每一个圆线元素需要独立地进行测量验证。FIM 读数不能超出圆跳动公差控制框中规定的公差值。在每一个测量面上的圆线元素必须位于规定的公差带范围内。

这个公差带由两个同轴的圆组成，圆环的径向间距为公差框中的公差值 0. 10mm。每一组同轴圆环公差带也同轴于基准轴 A—B。这个几何公差控制隐含这样的约束：受控特征面上的凹点不会深于 0. 10mm，受控面上的凸点不会凸出 0. 10mm。受控特征的尺寸公差约束是 ϕ25. 04 ~ ϕ25. 10mm，公差带宽为 0. 06mm。尺寸公差带 0. 06mm 比圆跳动公差带 0. 10mm 更紧，对形状控制更严格。所以尺寸公差接管形状控制，在直径方向上的圆柱度的变差必须小于 0. 06mm。圆跳动约束仅用来控制受控特征面偏心于基准轴的距离偏差。受控圆柱面特征轴线与基准轴线允许一半的圆跳动公差量 0. 50mm 的偏心度，或 0. 1mm 的轴线与特征轴线的同心度。

图 9-15 中也列出了两种用同轴的基准特征面建立基准轴线的方式。同轴的旋转圆柱面更好，但是也可以使用 V 形架替代，只要圆柱面能够满足圆度、直线度和锥度条件，就可以得到一个相对精确的测量读数。



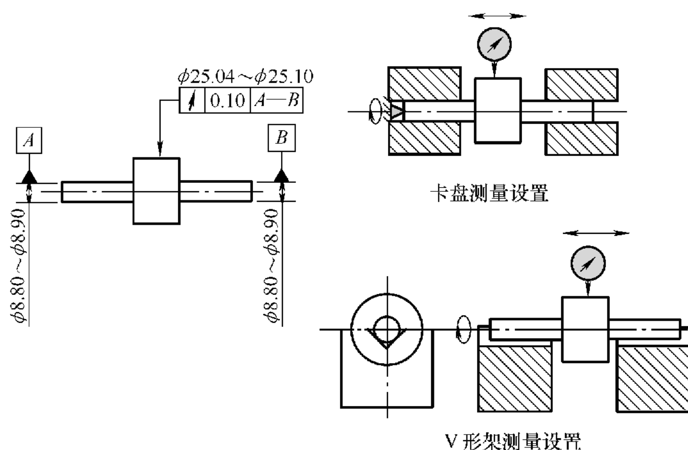


图 9-15 复合基准的定义及检测设置

图 9-15 中两种复合同轴基准特征圆柱面建立一个基准轴的方式对加工和检测的操作都是很困难的。如果没有两个针对同轴基准特征圆柱面 *A* 和 *B* 的最小圆周面套筒固定去固定基准特征，则使用 V 形架是不可取的，因为 V 形架不能稳定复合基准特征轴（尤其是当基准特征 *A* 和 *B* 实际形状超出圆度的要求时，例如，是一个椭圆形时）。图 9-16 所示是另一种解决方案。

图 9-16 所示的方式是使用台架或机床的中心定位（顶尖）。如果零件上两个中心孔的轴线与两个基准特征的最小圆柱面模拟的轴线一致，那么这种方式可以给出精确的值。所以中心孔的加工异常重要。如果不能同轴于实际的基准轴线，读数必然错误。并且，如果两个中心孔不能同轴，因为顶尖的自对中性，会破坏台架或机床上的顶尖表面，产生不均匀的磨损来迫使中心孔同轴。这也会导致一系列问题，如零件倾斜，或在 FIM 读数上产生偏差。

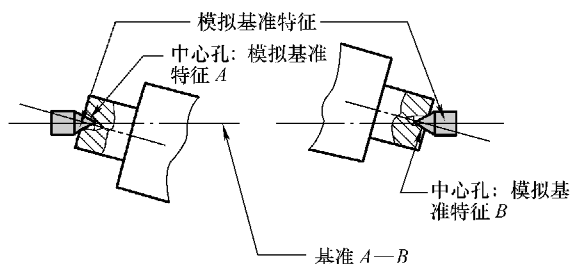


图 9-16 中心孔方式的检测设置方案

使用中心孔的方式定位的检测设置如图 9-17 所示。虽然基准特征 *A* 和 *B* 有自己的轴线，但都不是这个图中定义的基准轴线。这个基准轴线是复合基准轴线 *A*—*B*。一种实现这种定位方式的是，同时卡紧表面 *A* 和 *B*，然后在零件两端钻中心孔，然后就可以将零件放置在台架或机床上进行检测或加工了。检测时，零件绕基准轴线 *A*—*B* 旋转 360°，带读数的千分表沿纬线方向划过待测表面。FIM 读数不能超过 0. 10mm。应用这种方式要确保台架或机床创建的实际基准轴线和最小基准特征面形成的基准轴线同轴。

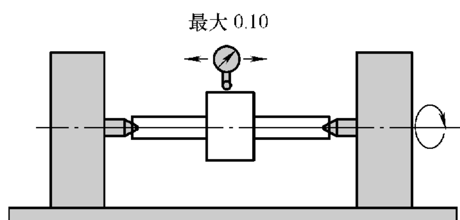


图 9-17 使用中心孔的方式定位的检测设置

全跳动的应用要素如下：

1）全跳动必须参考至少一个基准，这个基准特征建立了一个旋转的基准轴。

2）全跳动的公差带是两条平行线，所有面上的元素点必须位于两条平行线之间。全跳动在测量一个面时只设置一次。

3）全跳动内在地控制了圆度、同心度、面的直线度和锥度。所有的这些控制误差累积体现在这个面到轴的关系中。

4）注意全跳动只能应用在 RFS 条件下，不能够被 MMC 和 LMC 修正。

5）当全跳动应用到端面时，可以控制垂直度、摆动和平面度。

当测量全跳动时，千分表在特征面上沿直线移动，零件绕基准轴做 360°旋转，通常只是测量特征面上的部分圆元素，由于全跳动的公差是赋予这个特征的面元素，所以整个测量过程中只设置一次。

六、基准的建立

图 9-18 所示的零件的定义没有问题，但在实际加工检测过程中，会发现这个复合基准很难建立，所以设计者不可避免地会受到加工和检测者的抱怨。

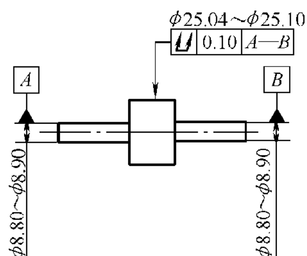


图 9-18　全跳动定义的零件

理论上，要求建立一个共同的基准轴线，这个基准轴线由两个圆柱面直径同时创建。反映到实际加工和检测时，就是一个内径圆柱面为基准特征 *A* 和 *B* 的最小包容面的轴套卡紧这两个特征，同时形成一个共同的基准轴线。然后零件绕这个基准轴线旋转或为加工或为检测，控制特征面的全跳动 FIM 读数（即圆柱度和同心度）。但是每个零件的基准特征 *A* 和 *B* 的实际直径不可能相同，这就意味着必须为每一个零件准备一个具有最小包容圆柱面为内径的轴套来实现定位。这在大批量生产时，在成本上是不可想象的。而且同时卡紧两个基准特征面也不是那么容易。

所以检测和加工者通常采取非完美的定位方式。比如，中心孔定位，虽然这种定位方式有局限性，但这是可以接受的，因为现实不可能存在完美的定位。

下面再简化一下这个定位的定义，只使用一个基准特征圆柱面 *A* 定位这个零件。通常会使用自定心卡盘夹住圆柱面 *A*。或许为了提高精度，升级到单动卡盘来夹紧零件的基准特征 *A*，但都不是一个理想的结果。虽然增加了卡盘与零件基准特征面 *A* 的接触面积，但在卡盘爪之间，理论上仍有可能没有接触到特征 *A* 上的高点。这个精度要求与现实应用的一个交叉点就是定位导致的偏差不会影响零件的装配及功能。

正如测量时默认的理想状态是测量操作不能对零件施加任何力，但在现实中这是不可能的。但是检测者和加工者清楚这对偏差的影响可以忽略或以某种方式补偿。至少多数情况，这种忽略都是正确的（笔者接触过因为月球的周期引力导致加工偏差的情况）。

如果一个检测者使用千分表的探针对一个特征面的几何公差控制进行检测，理想状态是要求探针能够接触到特征面上的每一个元素。或许某种情况下有可能做到，因为时间上的成本，没有人能实际这样操作过。通常都是按需要检测足够多的元素，如果这些必需的元素在公差范围内，则所有元素都在公差范围内。比如对于一个风窗玻璃的检测，通常在关键部位取足够多的点即可。这是一种非常可行的实现检测的办法。这就要求设计者在设计中要考虑



的，比如在图样上给出一个风窗玻璃检测点的数量和位置。

一旦理解现实的不完美性，理论上不可能实现图样上要求的设置和检测，设计者、加工者和检测者就能够更好地掌握他们的工作。如设计者必须对一个零件给出公差，因为现实中不存在理想状态的零件，检测者也必须明白检测过程中的设置有很多错误，加工者也要理解任何设备都有偏差。检测者可以参考他的操作指导书、标准、环境、设备和预算，然后融合对零件功能的理解，在这些条件下提出一个最合适的检测方法。这需要判断能力、专业能力和胆量。

如果这些设置导致的偏差太大，必然造成损失。一个项目的正常运行，需要这些人能在理论与现实要求之间足够谨慎。检测者要记住的是尽可能实现不可能的目标，并做到最好。

第十章　几何公差综合应用

一、基准建立的应用实例一

图 10-1 所示是一个基准建立的应用，可以参考以前介绍的基准知识选择合适的基准来建立这个零件的基准框。

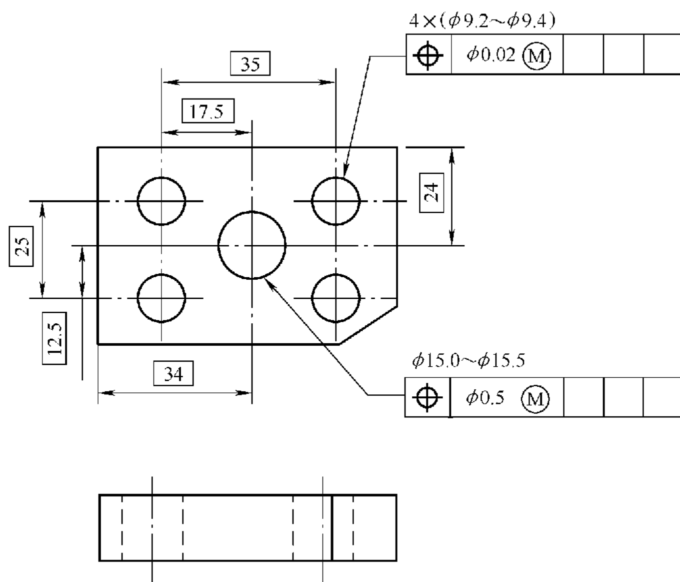


图 10-1　基准建立实例

图 10-2 所示是一种基准的建立方式，选择基准面 *A* 为主基准是因为这个面是一个安装面，如果尺寸公差不能达到稳定零件的要求，可以继续使用平面度来约束这个面。可以看出在本方案中，零件的孔阵定向垂直约束于主基准面 *A*，与 *A* 面至少三点接触。但是直接定位于基准 *D*，这个基准联同基准 *C* 作为一个 *X* 方向上的约束，保证了至少两点接触。然后基准孔 *D* 在 *Y* 方向上的另一方向上约束了这两个孔阵在空间中的 6 个自由度。这就是通常说的3－2－1定位方式。另外，孔阵直接参考一个基准孔的定位方式叫作直接公差方式，这种方式虽然需要两次设置，加工检测时需要两套夹具和检具，但比间接使用基准 *B* 和 *C* 定位的方法成本低、可靠性高。基准孔 *D* 只需要宽松地定位在零件上，不需要基准 *B* 和 *C* 有很高的加工精度。

二、基准建立的应用实例二

图 10-3 中基准的设置比图 10-1 中的复杂。这个圆形零件的孔阵也应用直接公差方法和 3－2－1 方式定位。首先设置有平面度要求的基准 *A* 为主基准，如图 10-4 所示 ，其他特征



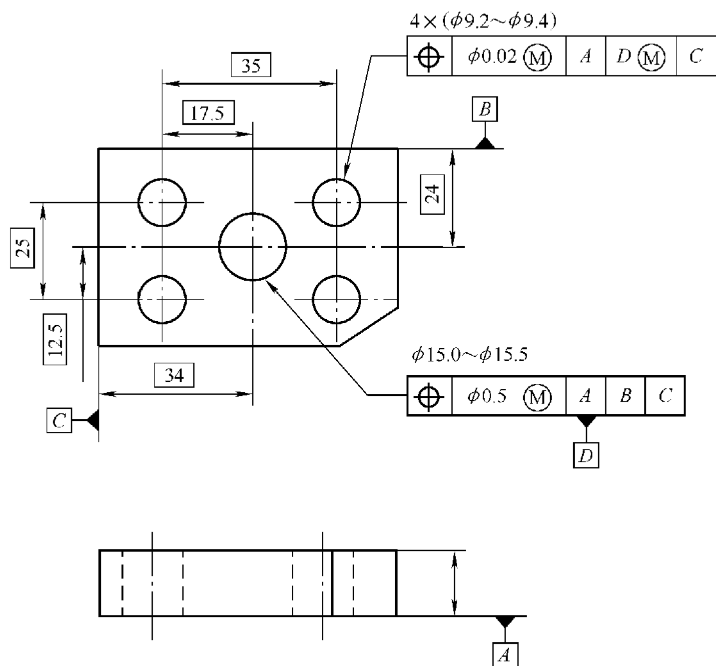


图 10-2　基准建立结果

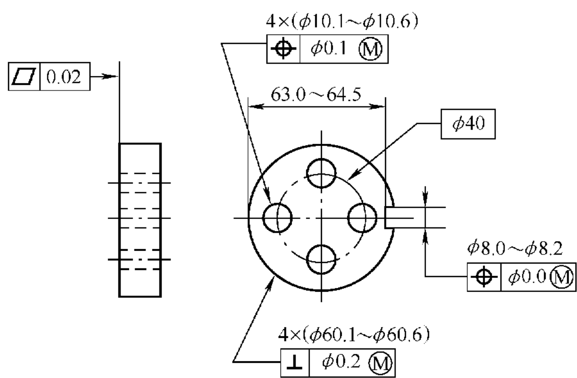


图 10-3　基准建立实例

和基准参考基准 A 建立。首先设置第二基准，第二基准需要至少两点接触，这里选择尺寸特征，零件的外圆的一个方向作为第二基准的一个定位，这个外圆只能在 X 或 Y 方向上提供一个方向的约束，另一个方向使用键槽 C 来约束。第三基准使用零件外圆的尺寸特征的 X 方向定位。至此就完全建立了一个基准框架，零件在空间中的 6 个自由度也可以完全被约束。

如果这个零件没有键槽特征，这个零件实际上在其圆柱面轴线上是 360°对称的。所以基准 A 和基准 D 虽然不能完全约束最终要定位的孔阵的空间自由度（可以绕轴线旋转），但是这不影响零件的加工。加工者只要将零件夹紧到基准 A 和 D 定位的夹具上，即可满足加工要求。

确定了基准特征，就可以设置基准的公差控制框了。基准特征 D 需要参考基准 A 建立，D 和 A 的内部关系是定向关系，即垂直关系。基准 C 需要先定向于基准 A 和基准 D 建立。这里基准 C 应用了零公差方式。最后的4 个孔阵定向于基准 A，定位于基准 D 和 C 建立公差控制框，如图 10-4 所示。

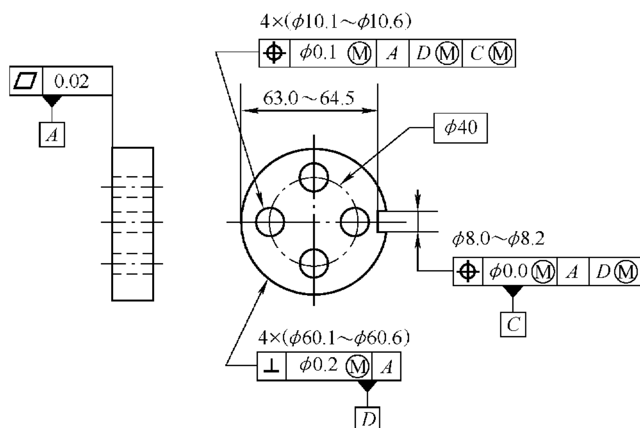


图 10-4　基准建立结果

三、汽车门外板的基准设置方案实例

如图 10-5 所示，考虑到汽车门外板是一个薄壁柔性件，在作为基准支承时有下垂变形发生，可重复性差，所以作为支承的主基准面 *A* 应该多于三点，图 10-5 中这个门外板的基准案例使用了 12 个支承面。经过计算和模拟，这 12 个支点可以保证门板的下垂变形量最小。布置这些安装点要考虑焊枪的干涉，以防止无法实现焊接或其他操作生产。注意这些基准的支承方向是与车身正交的，基准 *A* 的支承方向是车身横向方向。注意这些基准的顺序，也就是当门外板放于检具上时夹具的夹紧顺序，这个顺序由经验和计算模拟得出，可产生的累积误差最小。在检具的操作指导书上应该明确这个夹紧顺序。基准块的尺寸，即支承面的尺寸按照公司的标准参数来定。对于外覆盖件，这些基准面常常需要被制造成轮廓的形状，以实现正交支承。

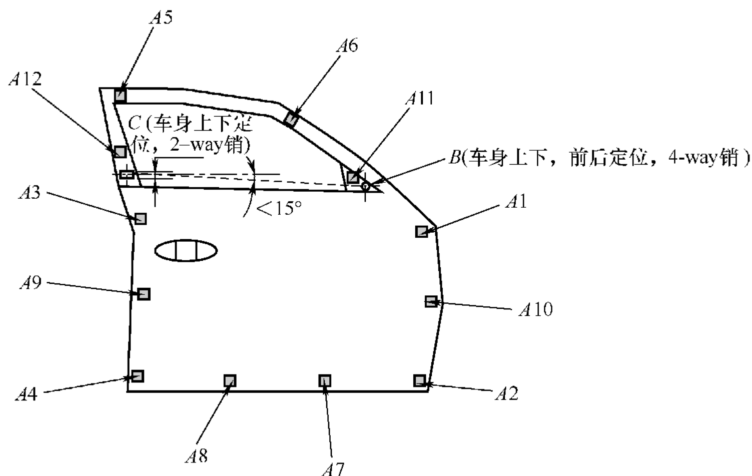


图 10-5　汽车门外板的基准建立



基准 *B* 是一个主定位销，通常被称为 4 – way 销钉。基准 *B* 定位了车身上下方向和前后方向。因为该门外板有安装螺栓的美观要求，所以这个孔借用了窗口下角后视镜的安装点。

基准 *C* 是一个槽形孔，这个槽形孔的窄边被作为 2 – way 销的定位，定位车身的上下方向。同样由于美观要求，这个槽形孔借用了窗口门柱上外饰件的安装孔。注意这个槽形孔的方向是车身的正交方向，不是沿着孔 *B* 和孔 *C* 的连线方向。通常，按照经验来讲，孔 *B* 和 *C* 的连线和槽形孔的水平方向之间的夹角应该小于 15°。这样是为了避免基准销的不确定定位情况发生，即可能是门外板在这两个检具销上的定位方向不是设计时正交的前后、上下方向，可重复性变差。

在主定位面上，*A*1 ~ *A*12 有至少 12 个定位点，而且基准销 *B* 和 *C* 提供两点接触的在车身上下方向上的定位作为次定位基准，最后 4 – way 定位的销 *B* 提供一个车身前后方向的定位作为第三基准，至此，可以得到为其他门板上子基准或特征定位的基准框架，如图 10-6 所示。因为 *B* 和 *C* 都是尺寸特征，而且门外板是一个旋转工作的零件，是一个可以很好地应用 MMC 修正来节省成本的零件，所以基准 *B* 和 *C* 使用 MMC 修正，公差值按照要求，如果适当也应该应用 MMC 修正，以降低成本。

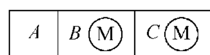


图 10-6　MMC 修正的基准设置

汽车门外板的开发需要许多前期的基准确认工作要做，因为门总成还有内板、加强梁等。选择基准的一个重要原则在这个例子没有体现出来的是，要尽量布置这些基准，使门内板、外板和其他子零件的基准统一，以消除因为加工中切换基准而导致的公差累积。

四、汽车翼子板的基准设置方案实例

汽车翼子板的造型独特，其基准设置如图 10-7 所示。

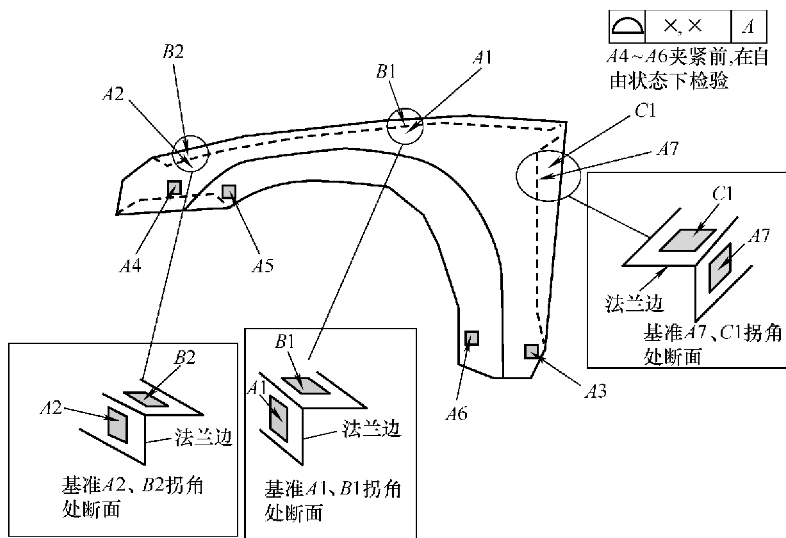
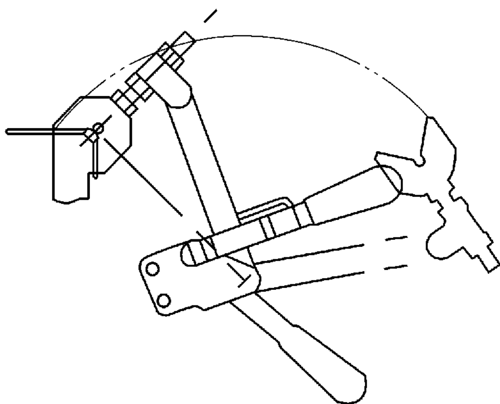


图 10-7　汽车翼子板的基准设置

翼子板存在多个拐角结构，是很好的双基准设置点，在基准布置中优先考虑这些拐角点。还是取车身正交方向布置基准，考虑翼子板的美观需要，没有可借用的安装孔或可设计基准孔来布置基准，所以选用支承点的方式。

考虑薄壁柔性件的特点，经过计算和模拟，图 10-7 中选用了 6 个基准 *A* 来支承零件，使翼子板的变形量降为最小，定位于车身横向方向。出于可重复性考虑，注意基准 *A*1 ~ *A*3 的布置跨越最大的面积，同样在检测时，基准 *A* 需要按顺序夹紧。

第二基准是由基准 *B* 产生的，是两个上下定位的基准支承。基准 *B*1、*B*2 和基准 *A*1、*A*2 的支承方式如图 10-8 所示，是一个非常典型的应用。


图 10-8　夹紧装置的示意图

第三基准由基准 *C* 建立，采用一点支承。

该方案中有一个“*A*4 ~ *A*6 夹紧前，在自由状态下检验”的标注，目的是保证零件在 *A*1 ~ *A*3 定位下，即零件在一个稳定的状态下，减少测量时的摇晃，进行零件的轮廓度测量。

五、汽车梁的基准设置方案实例

汽车梁是结构件，因为结构件具有直线直面的特点，并且梁上有很多线束或油管等的安装孔，所以基准设置较简单，但是要避免在法兰面上布置主基准的三个主定位支承。因为一般梁的材料是高强度钢，法兰的反弹很难解决，基准的可重复性不好。汽车梁类零件的基准设置如图 10-9 所示。

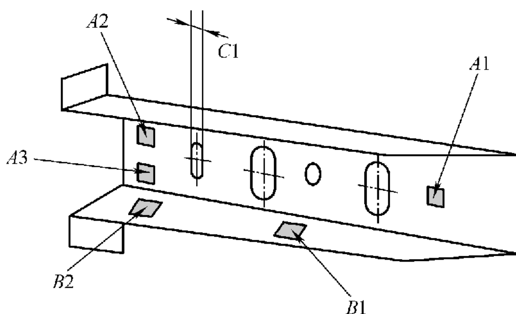


图 10-9　汽车梁类零件的基准设置

由于梁的刚性比较好，不易变形，所以选择了三个基准 *A* 支承。注意基准 *A* 布置在梁的非法兰面上，并且尽可能增大 *A*1 ~ *A*3 的定位面积，以提高主定位的稳定性。基准 *A* 限制了车身横向定位。

基准 *B*1 和 *B*2 限制了车身上下方向的定位，基准 *C*1 限制了车身前后方向的定位。至此满足了 3－2－1 的定位要求，零件被完全约束。另外需要注意的是，布置梁的基准时，需要考虑此梁与其总成零件的基准要统一，以避免基准切换时导致的累积误差。

六、补偿公差计算（孔或内部特征）

表 10-1 是一个孔（或内部特征）的补偿公差计算。由于这个孔（或内部特征）采用 MMC 修正，可以获得公差补偿。补偿公差是几何公差中很重要的计算。其计算公式如下

$$S_t = T_{mmc} + (S_1 - S_{mmc})$$

式中　S_t——补偿后的公差；

T_{mmc}——当孔（或内部特征）为最大实体尺寸时孔的位置度公差；

S_1——孔（或内部特征）的实际测量尺寸；

S_{mmc}——孔（或内部特征）的最大实体尺寸。

表 10-1　孔（或内部特征）的补偿公差计算　（单位：mm）

孔的实际尺寸	MMC	补偿公差	位置公差	补偿后的位置公差
15.9	15.3	0.6	0.2	0.8
15.8	15.3	0.5	0.2	0.7
15.7	15.3	0.4	0.2	0.6
15.6	15.3	0.3	0.2	0.5
15.5	15.3	0.2	0.2	0.4
15.4	15.3	0.1	0.2	0.3
15.3	15.3	0.0	0.2	0.2

七、补偿公差计算（轴或外部特征）

这个应用是针对外部特征（如轴类）的补偿公差计算，见表 10-2。注意，当轴的加工直径为 ϕ15.2mm 时，说明这个轴超出零件的 LMC，为不合格零件，无需进行下一步的补偿公差计算。外部特征（如轴类）的补偿公差计算公式为

$$S_t = T_{mmc} + (S_{mmc} - S_1)$$

式中　S_t——补偿后的公差；

T_{mmc}——当轴（或外部特征）为最大实体尺寸时的位置度公差；

S_1——轴（或外部特征）的实际测量尺寸；

S_{mmc}——轴（或外部特征）的最大实体尺寸。

表 10-2　轴（或外部特征）的补偿公差计算　（单位：mm）

轴的实际尺寸	MMC	补偿公差	位置公差	补偿后的位置公差
15.9	15.9	0.0	0.2	0.2
15.8	15.9	0.1	0.2	0.3
15.7	15.9	0.2	0.2	0.4
15.6	15.9	0.3	0.2	0.5
15.5	15.9	0.4	0.2	0.6
15.4	15.9	0.5	0.2	0.7
15.3	15.9	超差		

八、轴的实效边界计算

实际上，知道了如何计算实效尺寸，也就知道了如何计算检具尺寸（检验边界的装配状态），或者是与这个尺寸匹配的零件的尺寸，实际制作检具时要考虑检具的公差和磨损，通常为检测尺寸公差的10%，这与GR&R的要求一致。其实对于一个检具来说，无论看起来多么复杂，都可以简化为检具销或孔的计算。会了简单的检具销设计也就会了检具设计，即实效尺寸计算，就能知道如何设计一个检具，当然对于公差的实际分配还需要一定的工程经验。

轴（或外部特征）的实效边界计算公式为

$$V_c = T_{mmc} + S_{mmc}$$

式中　V_c——实效边界；

T_{mmc}——当轴（或外部特征）为最大实体尺寸时的位置度公差；

S_{mmc}——轴（或外部特征）的最大实体尺寸。

如图10-10所示，已知这个轴的公差要求，要计算轴的匹配孔的实效边界，即轴的匹配边界。根据外部特征的实效边界计算公式，可以得到实效边界为 ϕ25.5mm（= ϕ25.4mm + ϕ0.1mm）。

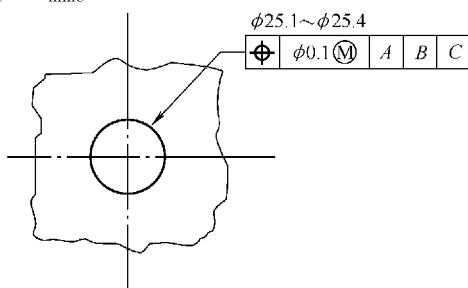


图10-10　轴的位置度定义

九、孔的实效边界计算

孔（或内部特征）的实效边界计算公式为

$$V_c = S_{mmc} - T_{mmc}$$

式中　V_c——实效边界；

T_{mmc}——当孔（或内部特征）为最大实体尺寸时的位置度公差；

S_{mmc}——孔（或内部特征）的最大实体尺寸。

图10-11所示是求一个孔（内部特征）的实效边界计算，也可以是匹配件的边界。根据计算公式，这个孔的实效边界为 ϕ24.9mm（= ϕ25.2mm − ϕ0.3mm）。

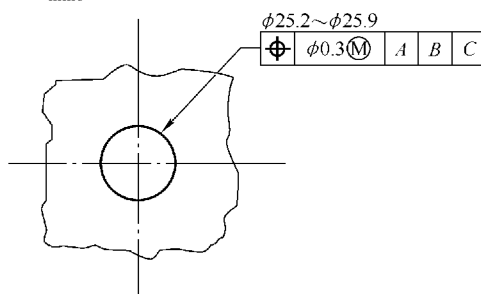


图10-11　孔的位置度定义

十、RFS修正的孔的配合边界与零公差注意事项

图10-12所示的孔应用RFS原则，没有公差补偿。

因为没有MMC修正，计算结果是这个零件的位置公差为 ϕ0.0mm，即不能获得尺寸公差的补偿，意味着这个孔的位置度公差永远是 ϕ0.0mm！这在现实中是不可能加工出来的。



所以这个定义是错误的，当对零件的实效边界进行计算和零公差应用时，要注意避免零公差的出现。

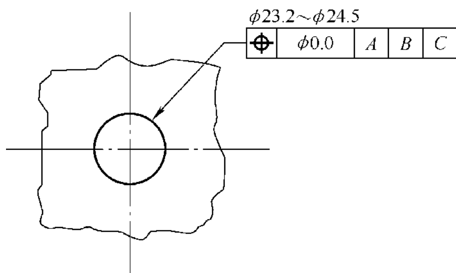


图 10-12　RFS 修正的孔的位置度定义

十一、GD&T 中两种尺寸标注的比较和 Ppk 曲线的应用

GD&T 中大量使用了上、下极限尺寸，如图 10-13a 所示的尺寸标注方式，对于正负偏差尺寸的标注方式（图 10-13b）很少应用，此处是以孔为例研究的，轴的应用原理相同。

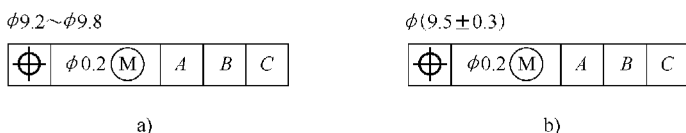


图 10-13　两种位置度定义的比较

之所以如此，是因为几何公差补偿的应用。对于图 10-13a 所示的标注方式，在 MMC 修正下，如果是孔的话，那么意味着孔的尺寸越接近 LMC，即孔越大，那么补偿后的位置度公差越大，意味着加工成本越低，更多的零件可以通过检验。另一方面，孔越大，也意味着装配越容易。所以上、下极限尺寸方式和 MMC 修正符号同时应用时才有意义。

但对于图 10-13b 所示的正负偏差方式，应该理解为，设计者希望得到一个均匀公差或者设计者认为能够保证零件功能的情况下的一个特定值最好，而赋予一个公称尺寸一定的公差值，意图是保证多数零件的加工尺寸分布在这个中值附近。虽然在 MMC 修正的情况下有补偿，但是不如上、下极限尺寸标注方式那么显著。

这两种方式隐含的加工意义完全不同。图 10-13a 所示的设计完全出于最低成本考虑，告诉加工者加工尺寸集中于 φ9.8mm。而图 10-13b 所示的标注是告诉加工者保证加工尺寸集中于 φ9.5mm，不考虑成本。

图 10-14 是对图 10-13a 所示公差带的曲线分析。在孔的尺寸为 φ9.8mm 时，位置度公差为 φ0.8mm，达到最大，也是加工成本最低的目标尺寸。孔的 MMC 尺寸 φ9.2mm 的功能是设计这个孔的装配间隙，此位置的公差带为 φ0.2mm。这个孔的实效边界（即最差条件的装配边界）是 φ9.0mm。在分析曲线中，给出了一个浮动边界 φ10.6mm，这个浮动边界的功能是确认零件的强度以及最小壁厚。

由图 10-14 和图 10-15 可以看出，按照图 10-13a 所示的标注方式，该零件的每一个边界都有自己的功能。

图 10-13b 中标注的尺寸使用 MMC 修正，有一个冲突是，这个尺寸的标注仅仅关注尺寸 φ9.5mm，但是却得到与图 10-8a 所示标注方式的同样边界，这样会造成加工者对设计者的意图产生迷惑。所以通常在尺寸是正负偏差时，不使用 MMC 修正。RFS 修正也符合控制均匀公差的目的。所以改为 RFS 修正图 10-13b 所示标注的公差曲线分析如图 10-16 所示，以明确设计要求。

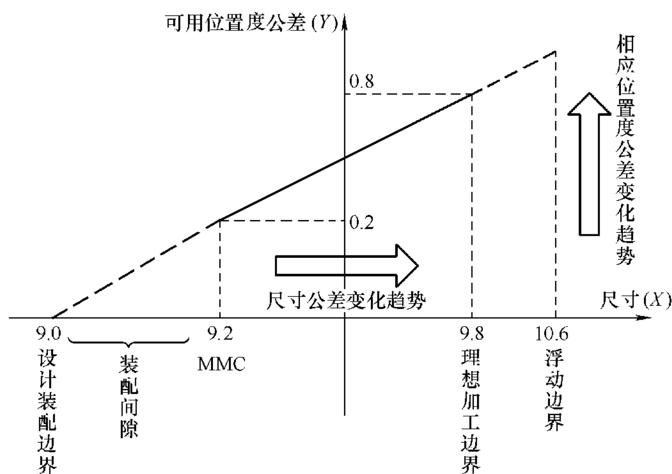


图 10-14　孔的位置度约束公差带变化曲线

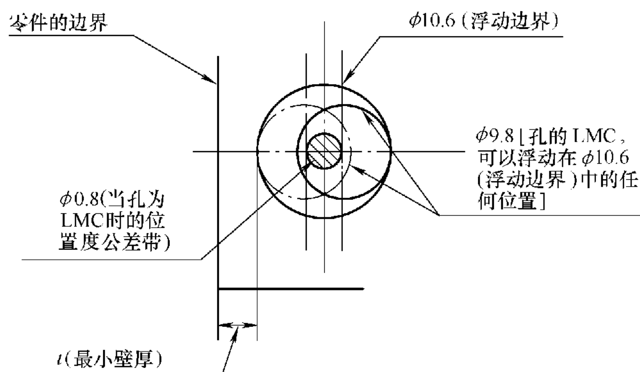


图 10-15　孔的位置度约束公差带示意图

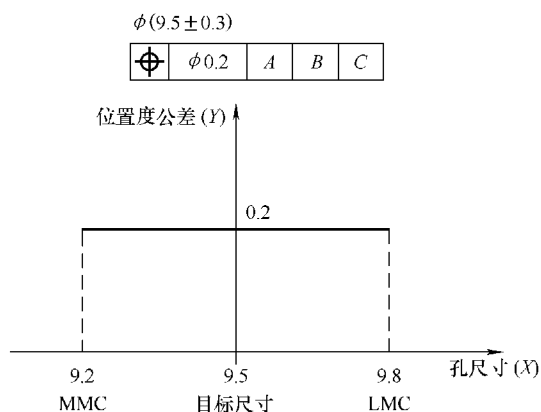


图 10-16　RFS 修正的位置度公差带变化曲线（常量）

Ppk 是质量控制中衡量过程能力的重要参数。在采用最大实体尺寸修正的情况下，结合 GD&T 知识分析 Ppk，不能只考虑 Ppk 的大小来判断过程能力是否需要改善。由于轴小孔大的加工理念（获得更大的经济效益），还要判断分布是在中值的哪一侧。如图 10-17 所示，如果是孔的分布曲线，那么分布 1 不需要改善到分布 2 的状态。

对于这个孔的尺寸，加工目标是孔的 LMC，即 ϕ9. 8mm，Ppk 曲线的中值希望分布在 USL 附近。从这一点看来，图 10-13a 所示方式标注的孔实际上不适用正太分布 Ppk 的分析。但当这个中线分布在 ϕ9. 5mm 的左侧时，就要提出生产能力改善的建议，以期望零件的尺寸都分布在 ϕ9. 5mm 的右侧。



对于图 10-13b 所示方式标注的孔，非常适合使用 Ppk 曲线分析。因为图 10-13b 中明确了一个加工中值，即 ϕ9.5mm。如果实际跟踪统计的结果是 Ppk 曲线分布在 ϕ9.5mm 的左侧或右侧，那么整个生产程序都需要提出改善。

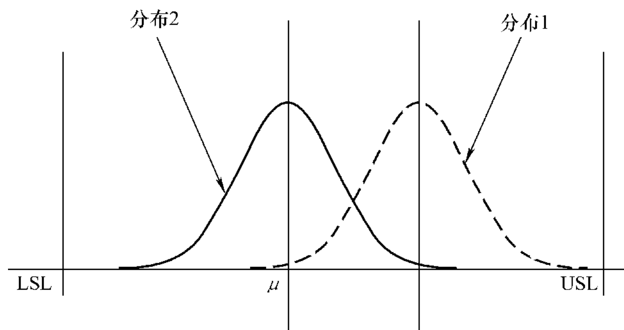


图 10-17　Ppk 曲线与生产能力改善原理曲线

对于外部尺寸（如轴类），这个分析同理。

应注意的是，上述的结论应用于 MMC 条件下控制的几何公差，对于 RFS 修正的公差，因为要得到一个一致的装配间隙，以达到平均分布零件质量的目的（多应用于旋转零件），这时设计者就要给出一个带公差的尺寸值，加工者和检测者必须按照这个给定的中值设置加工公差，虽然这样会增加成本。

十二、尺寸公差和几何公差的转换

从尺寸公差转换为几何公差是一个很好的应用几何公差的方法。标注时，可以先标注尺寸公差，然后再转换成几何公差。例如，把图 10-18 中的尺寸公差转换为几何公差的方法如下：

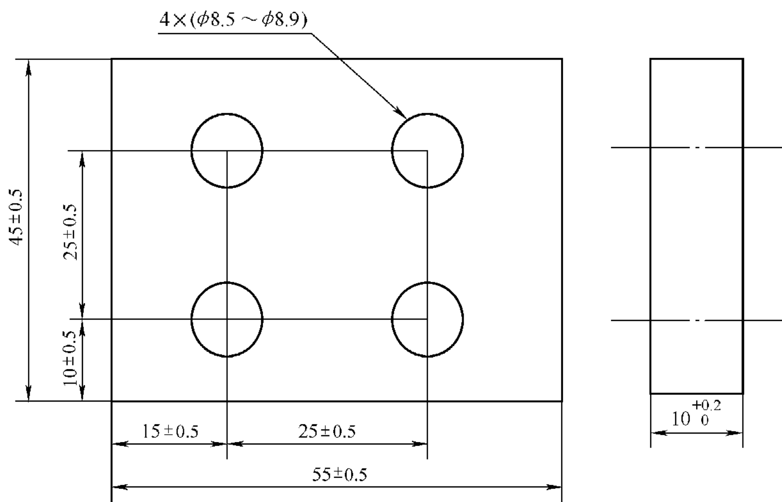


图 10-18　一个尺寸公差约束的零件图

转换之前，要先分析一下该图样。除了厚度尺寸 10mm 可以延用到几何公差外，其他的尺寸都需要转换，包括本体的外形轮廓（轮廓度）、孔的位置度（位置度公差）和孔的尺寸公差（可以直接应用），考虑降低成本，也可以尝试使用 MMC 条件。

对于位置度公差，从尺寸公差的矩形公差带到几何公差的圆形公差带的转换，其法则就是尺寸公差带的矩形对角线等于几何公差带的直径尺寸（若影响壁厚，不适用），所以 $D=\sqrt{2}a$。其中，D 为几何公差带直径；a 为矩形公差带边长。公差转换的原理如图 10-19

所示。

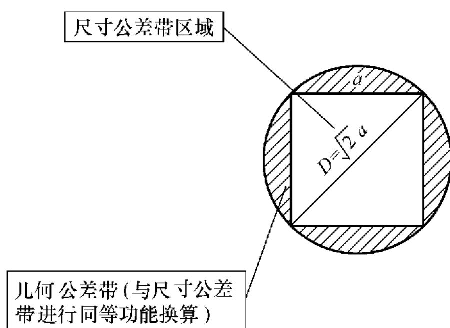


图 10-19　公差转换的原理

（1）设置基准（图 10-20）　因为 55mm × 45mm 的大平面为此零件的装配面（也称为功能面），所以选取右侧视图定义主定位 *A*，然后在 *A* 的垂直面上选取次定位和第三定位，由于基准 *A* 为主定位，无需基准参考，所以可以直接用形状公差——平面度来控制。这里应用几何公差的第一法则，尺寸公差直接作为几何公差。由于 55mm 的边更长，能形成一个更长的直线，这样次定位更加稳定，所以选取 55mm 长的边为次定位，定义为 *B*，在另一个垂直面上 45mm 的边可以作为第三定位，定义为 *C*。

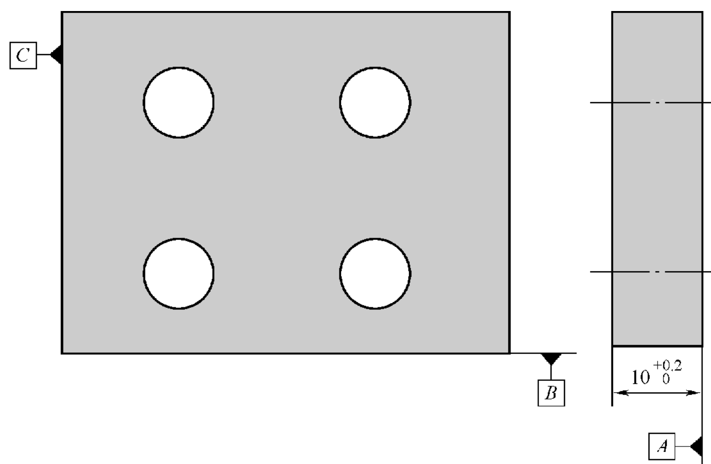


图 10-20　设置基准

（2）确定公称尺寸和位置度公差（图 10-21）　由公式 $D=\sqrt{2}a$ 可得 $D=\sqrt{2}\times 1\text{mm}=$

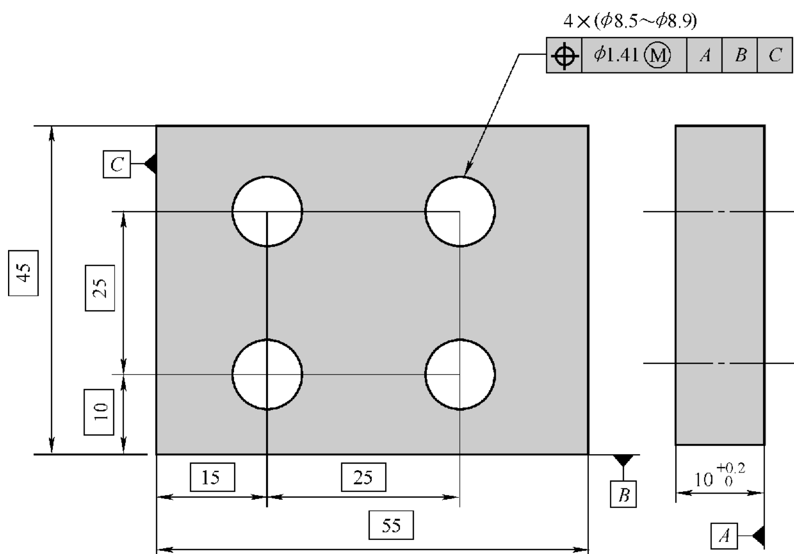


图 10-21　确定公称尺寸和位置度公差



1.41mm，所以位置度的公差为1.41mm。

原位置度公差变为公称尺寸，应用位置度可以用MMC条件修正（节省成本），公差的应用框架是在基准*A*、*B*和*C*定位下。

（3）确定轮廓度（图10-22）　由于零件轮廓的尺寸公差是等边公差，故可以直接应用。应注意其公差基准设置是在基准*A*、*B*和*C*定位的框架下。

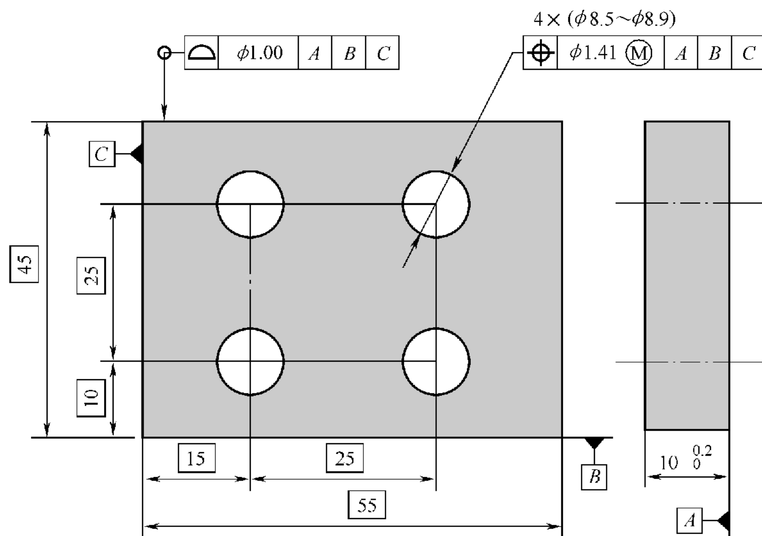


图10-22　确定轮廓度

十三、MMC、RFS和LMC的应用及对比

当定义一个公差时，要根据受控特征的功能来应用这些材料条件修正。应用材料条件修正时，应尽可能使用MMC修正。无论是加工还是检验，RFS都比MMC需要更多的成本。

当材料符号应用于孔或槽的基准修正时（MMC或RFS），MMC修正的基准是一个直销，基准孔或槽的最大实体尺寸，即孔的公差下限（加上10%的加工误差和磨损）为检具销的尺寸。MMC修正的检具销和零件上的孔或槽存在一个间隙。因为在总成中，这个间隙导致的误差会传递到下一级总成，所以要计算分析累积误差，慎重选用基准销尺寸和材料修正方式，并且通常检具和夹具要求使用相同材料符号修正的检具销，这也是按照图样要求的方法。相对于RFS修正的检具销来说，MMC修正的检具销的成本更低且更容易维护。MMC修正的基准销检具能够跟踪系统偏差，但是由于零件在检测中可以浮动，所以不能区分是生产工艺偏差还是零件本身的偏差。

RFS修正的检具销是一个锥销或可扩展销，表现为待检测或加工特征与基准的尺寸无关。RFS修正的检具销和零件上的孔或槽不存在间隙。因为RFS修正的检具销和基准特征孔或槽是接触的，零件不能在检具或夹具上浮动，所以能够定位特征的实际中心，继而零件的测量也更准确。这个优点使后续的生产过程变差和零件本身加工变差容易区分，能够快速解决变差问题，但是锥销和可扩展销的加工维护成本都很高。因为和有变差的基准孔或槽接触定位，会导致柔性零件变形，测量误差反而变大，因此建议少用RFS基准定位的方式。

RFS 和 MMC 修正的检具都有可重复性的问题。如果 MMC 修正的零件的尺寸公差的精度不够，那么可重复性是很差的。对于 RFS 修正，如果零件是柔性件，变形的原因会导致可重复性差。

对于螺纹特征，装配特征是螺纹的节圆直径，当节圆的尺寸变化时，螺纹特征的位置公差可以获得补偿。因为螺纹具有自动对中性，虽然获得的补偿量微乎其微，而且很难数量化，但还是有，并且能改善螺纹的装配，所以还是建议对螺纹特征使用 MMC 修正。

总的来说，MMC 修正是一个设计者主动缩减成本的应用。

当公差框中没有 MMC 修正符号时，则默认为 RFS（尺寸不相关原则）。RFS 并不意味着紧公差配合，RFS 应用于装配有严格要求的情况下（均匀的装配间隙），或者一个高要求的旋转体（相对于轴线均匀分布质量）。MMC 控制的零件匹配特征有向孔或槽的中心偏斜的倾向；RFS 更严格的要求是装配间隙（间隙一致），MMC 规定的公差可以比 RFS 规定的公差带更窄。

LMC（最小实体尺寸条件）主要应用在铸造领域，是为了保留最小的加工余量而设定的一个条件。

设计者需要正确选用这些材料修正符号，向加工者和检测者传递正确的特征功能信息。

十四、第一法则（包容原则）应用实例

几何公差的第一法则：如果没有几何公差，尺寸公差代替几何公差控制的要求，并同时控制尺寸要求。此时所有特征元素不能超过最大实体尺寸。当实际特征尺寸由 MMC 向 LMC 变化时，外形公差可以得到补偿。图 10-23 所示为第一法则约束下的轴，请思考以下几个问题：

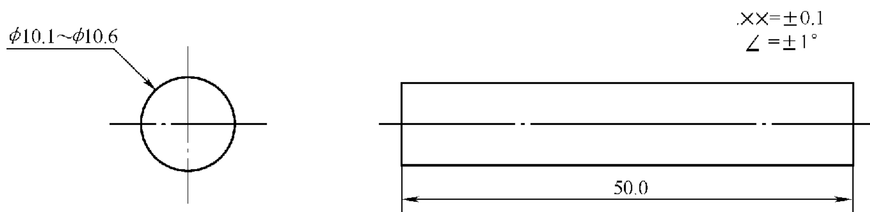


图 10-23　第一法则约束下的轴

1）此标注隐含的直线度是多少？

由于没有几何公差要求，应用第一法则，外圆直径代替此轴的直线度要求。直径尺寸公差是 10.6mm－10.1mm＝0.5mm。所以隐含的直线度是 0.5mm。

2）如果销轴的实际加工尺寸是 ϕ10.3mm，那么它的直线度是多少？

这个销轴的最大实体尺寸是 ϕ10.6mm，实际尺寸是 ϕ10.3mm，那么此时的直线度是 10.6mm－10.3mm＝0.3mm。

3）如果销轴直径的实际加工尺寸是 ϕ10.5mm，那么它的直线度公差是多少？

同上一问题，此时的直线度是 10.6mm－10.5mm＝0.1mm。

4）如果销轴的实际加工尺寸是 ϕ10.6mm，那么它的直线度是多少？

此时的直线度是 10.6mm－10.6mm＝0.0mm。注意此时实际加工尺寸是销轴的 MMC，



直线度公差为 0. 0mm，实际上是无法加工出来的。

5）如果销轴的实际尺寸是 ϕ10. 1mm，那么它的直线度是多少？

因为此时直径尺寸为 LMC，余留给直线度公差最大为 10. 6mm – 10. 1mm = 0. 5mm。LMC 是理想的加工尺寸，这时加工成本最低，如果没有特殊要求，这个零件在装配中也是最容易的，因为这时的间隙最大。

十五、零件的配合设计应用

关于 GD&T 的装配条件，有以下三种情况。

1. 第一种装配条件（通用装配条件）

假如一个零件上孔的位置度公差控制框为 ϕ19.1~ϕ19.8 [⌖ | ϕ0.2Ⓜ | A | B | C]，试设计一个与该孔配合的轴，要求能够保证静态装配。

因为 MMC 修正的特征是满足静态配合，可能发生公差间隙不均匀的装配。这个孔在最大实体尺寸为 ϕ19. 1mm 时，其公差为 ϕ0. 2mm。

第一步，可以得到这个零件的公差补偿曲线，如图 10-24 所示。

可以求出这个孔的实效边界 VC（Virtual Condition）为 19. 1mm – 0. 2mm = 18. 9mm。也就是孔的装配边界是 ϕ18. 9mm，即当这个孔的位置度为零时，能保证装配的孔的合格边界尺寸。要注意这个尺寸是无法实现的。因为尺寸公差和位置度公差的补偿原理是一对一的关系，所以孔的公差曲线是斜率 $k = 1$ 的线性曲线。图 10-24 中，横轴代表孔的尺寸，纵轴代表孔的位置度公差。

第二步，推算配合轴的公差曲线。

轴的补偿曲线一定是一条斜率 $k = -1$ 的线性曲线，如图 10-25 所示，这个轴在 ϕ18. 9mm 尺寸以左的斜线下的面积都能满足这个孔的装配。按照设计要求，假如在成本和装配间隙的要求下，取值 ϕ17. 9 ~ ϕ18. 3mm，那么对应的位置度公差便可确定下来。如图 10-26 所示，AB 之间的区域为设计的最小间隙，大小为 19. 1mm – 18. 3mm = 0. 8mm，即设计的径向最小间隙为 0. 4mm。

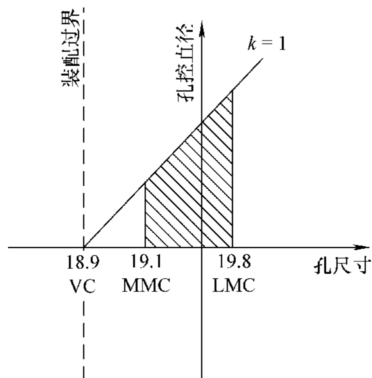


图 10-24　公差补偿曲线

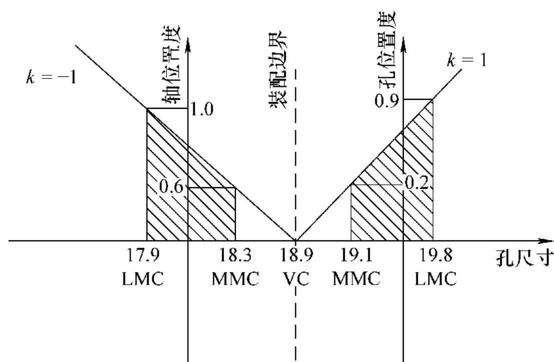


图 10-25　配合轴的公差补偿曲线

第三步，完成配合轴的公差控制框。

按照配合曲线图，可以完成轴的公差控制框，即 ϕ17.9~ϕ18.3 [⌖ | ϕ0.6Ⓜ | A | B | C]。

对于配合曲线，还可以有其他应用。首先是对于通止规和功能销（位置度检测销）的设计。MMC代表通规尺寸，LMC代表止规尺寸，VC代表功能销的尺寸。实际制作过程中，还需要考虑10%的加工误差和磨损。对于孔和轴的通规尺寸是ϕ19.1mm和ϕ17.9mm，止规尺寸是ϕ18.3mm和ϕ19.8mm，如图10-27所示。

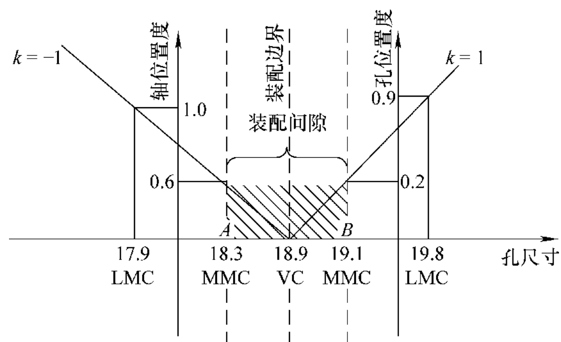


图10-26　配合设计的间隙

图10-27也可以作为返工、返修的指导。如图10-27所示，当轴的零件处于B阴影区时，零件合格。如果零件处于A区，表明零件尺寸小于LMC，无法返修，直接报废。如果零件处于C区，虽然这个轴尺寸大于MMC，从尺寸上判为不合格零件，但在$k=-1$的斜线区域内，零件也能够满足装配。如果没有特殊的间隙功能要求，零件可以判为让步接收或放行，但可能发生装配难度增加的问题。如果零件处于D区，则为不合格的孔类零件，这个孔在位置度上超差，方案是返修，根据尺寸公差和位置度公差互相补偿的原理，通过扩大孔来增大位置度公差，以达到满足装配的目的，使这个孔移到孔的合格区内。返修工具要适当选取一个直径在ϕ19.3～ϕ19.8mm之间的钻头。

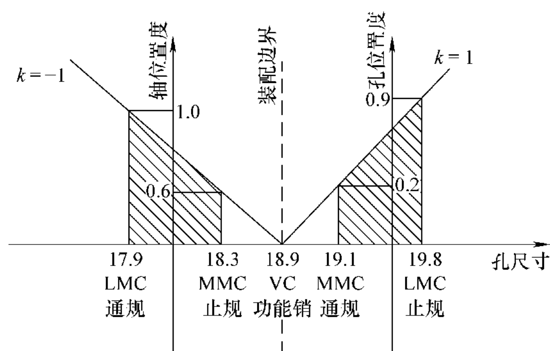


图10-27　通止规设计

假设不合格孔所处的坐标为（S，P），那么在维修方案中，最小的钻头直径为

$$D_1=S+(P-S+\mathrm{VC})=P+\mathrm{VC}$$

式中　D_1——最小钻头直径（最小修正内部尺寸）；

S——实际孔的直径；

P——实际孔的位置度；

VC——实效边界常量。

以上是第一种装配条件的设计方法，对于这种方式，无论是单个特征装配，还是阵列特征装配都适用。

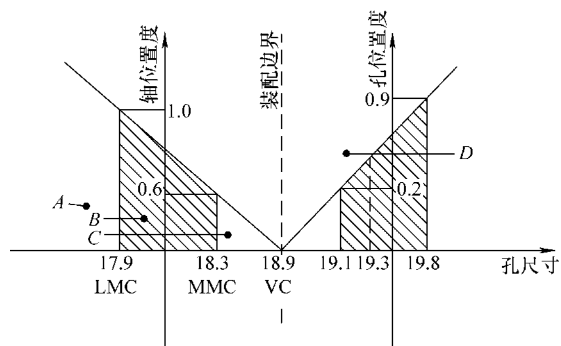


图10-28　处于不同区间的零件的处理方式

2. 第二种装配条件

第二种装配情况如图10-29所示，因为实效边界即装配边界不再是最大实体尺寸和位置度的关系，而是直接指定为第三个装配零件——浮动装配螺栓的直径。

在这个装配中，可以在机械设计手册里查出M12螺栓的实际外径尺寸，这里取ϕ12mm。

这两个孔的MMC＝ϕ13.6mm，LMC＝ϕ12.8mm，VC＝ϕ12mm（螺栓大径尺寸）。



当上、下两个孔板的孔的轴线在相对方向浮动的时候，装配条件最差。所以考虑用这种装配状态来定义这两个孔的位置度，来满足位置度要求。

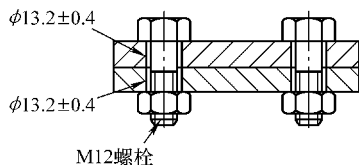


图 10-29　浮动螺栓的装配

由于已知 MMC 和 VC，要求位置度。所以每个孔的位置度公差为 MMC − VC = 12.8mm − 12mm = 0.8mm。

也可以使用配钻孔的方式来定义这两个孔，定义两个或多个装配孔的中心线在相对位置上的偏差，即在这个装配总成上标注成 2×(ϕ12.8~ϕ13.6) |⊕|ϕ0.8Ⓜ| 。

注意这个公差控制框，并不是这个位置度没有基准约束，而是在这里两个孔互为基准。

可能还会遇到这种情况，即其中一个孔板是采购的，此时其中一个孔板的孔的位置度是已经定义了的，那么该如何定义其配合孔板上孔的位置度呢（图 10-30）？

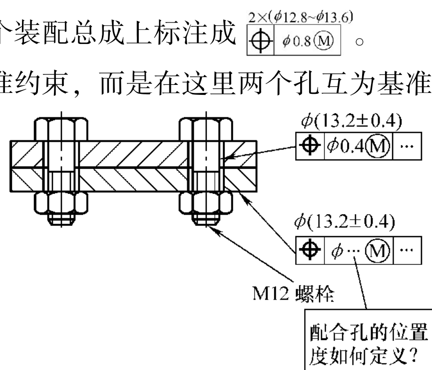


图 10-30　已知条件的浮动螺栓装配

因为保证 ϕ12mm 的装配边界的两个孔的轴线的偏差总量为 ϕ1.6mm，第一个孔板允许的浮动量为 ϕ0.4mm，那么另一条轴线的相对浮动量为 ϕ1.6mm − ϕ0.4mm = ϕ1.2mm。

3. 第三种装配条件

图 10-31 所示是固定螺栓的装配情况。如果螺纹板的螺纹孔的位置度加工能力为 ϕ0.4mm，那么如何定义孔板上孔的位置度？

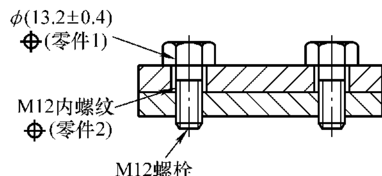


图 10-31　固定螺栓装配

这种情况下的实效边界为 VC = 螺栓的外径（这里取 ϕ12mm） + 螺纹孔的位置度 = ϕ12mm + ϕ0.4mm = ϕ12.4mm，所以可用的装配间隙为 ϕ12.8mm − ϕ12.4mm = ϕ0.4mm。所以孔板上孔的位置度为 ϕ0.4mm，标注为 ϕ19.1~ϕ19.8 |⊕|ϕ0.4Ⓜ|A|B|C|。

在实际应用过程中，会有阵列孔或销的装配情况，其解决方式相同。这种分析方法可以整合到企业的设计软件中，实现自动匹配设计，达到加快开发进度、降低设计成本的目的。

4. 孔阵的装配设计

对于装配设计，都可以简化为内部特征和外部特征之间的配合关系，无论为矩阵特征或圆形阵列特征，都要考虑与实效边界尺寸的匹配。

图 10-32 所示定义了一个 4 孔板，和图 10-33 所示的销钉板装配。其实效边界为 ϕ6.9mm。按照前面介绍的配合设计方法，其配合轴的实效边界只有与孔板上孔的实效边界（为 ϕ6.9mm）相等，才能保证装配。

图 10-33 所示是配合销钉板的基准尺寸定义。首先将两个零件的基准框架统一（定义统一的坐标系原点），并使用公称尺寸定义配合销钉板的理论尺寸，将配合销钉板的公差带定位到与孔板相同的理论空间位置。销钉座的装配面（功能面）作为主定基准 A，长边作为基准 B，短边作为基准 C，基准框架的中心在销钉板的左下角，如图 10-34 所示。

该设计要达到两个目的：一个是销钉板的四个销柱能够同时插入孔板，另一个是两个零件的边沿要平齐（或间隙均匀）。先计算孔板四个销钉的配合边界——实效边界，并根据功

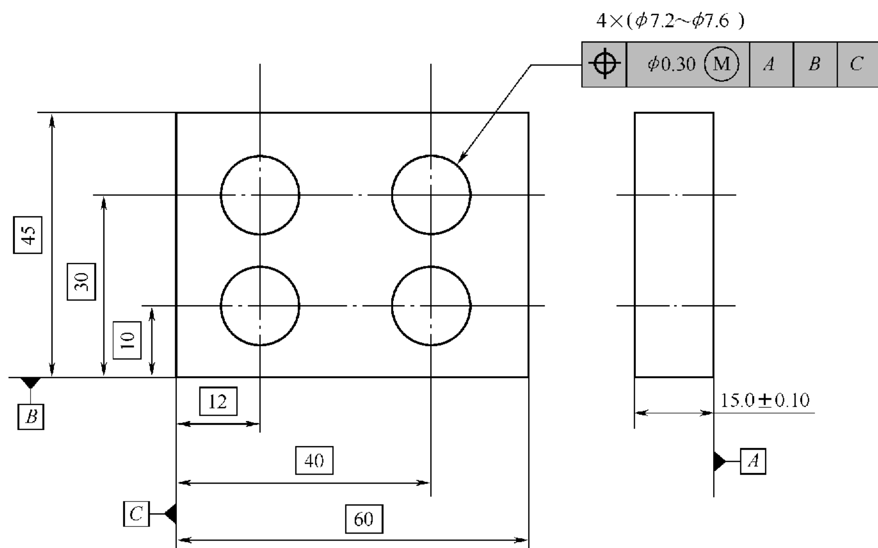


图 10-32　孔板的几何公差图

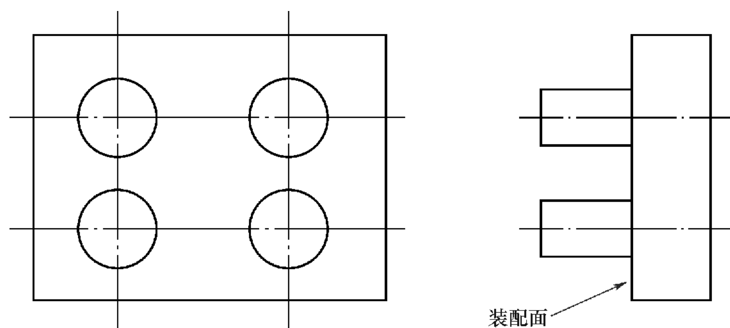


图 10-33　配合销钉板

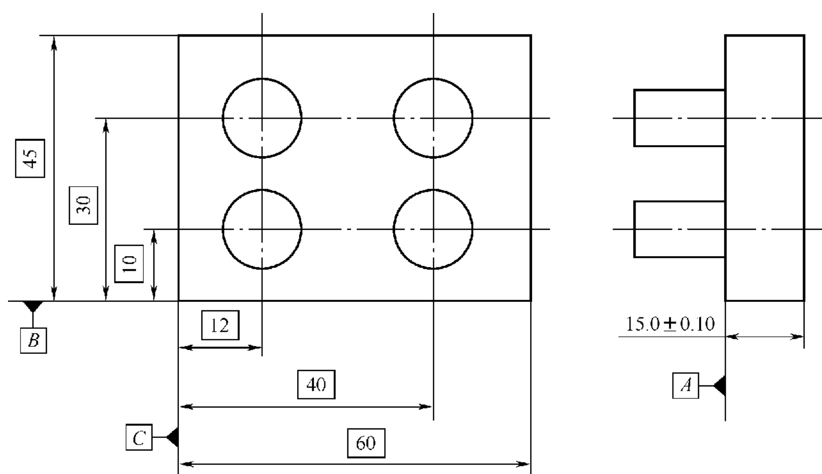


图 10-34　销钉板的基准尺寸定义

能定义设计间隙，确定配合销的最大实体尺寸（MMC），并根据零件的功能、成本和加工能力选择零件的精度和零件的公差带。

图 10-35 所示的公差定义方式，配合销的实效边界为 ϕ6. 95mm，大于孔板上孔的实效



边界尺寸 ϕ6.9mm。如果将这个补偿曲线画出比较理论的配合销的实效边界曲线，实际上是包含了图 10-35 中定义的销的实效边界尺寸 ϕ6.95mm，所以仍能保证装配。但是这种设计不是最优化的，浪费了可用的公差区间，会使成本增加，应该避免这种设计。

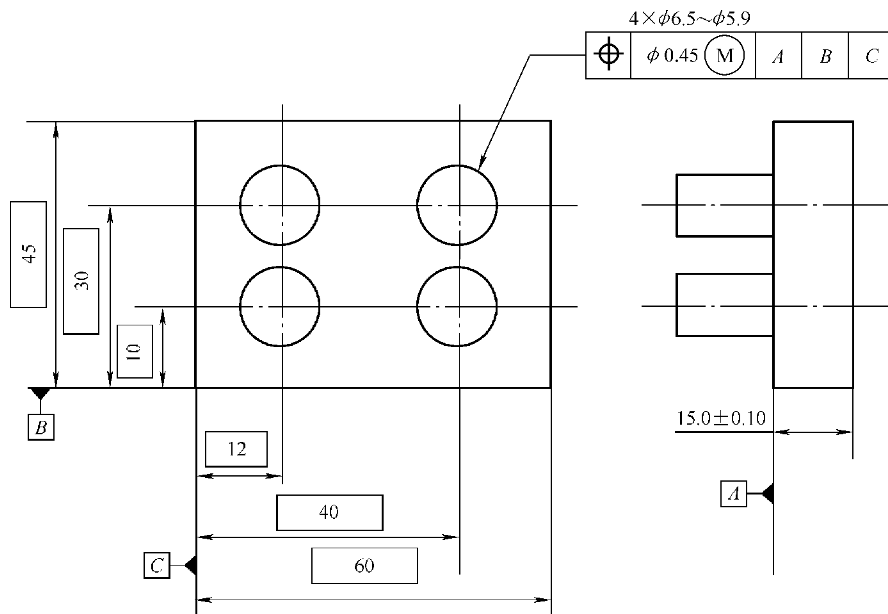


图 10-35　销钉板的公差定义（一）

如果配合销钉板的尺寸分布在设计的配合曲线内，那么就不存在干涉情况，销和孔之间有足够的间隙分布，也能保障销钉板和孔板之间的边沿平齐。如果使用组合公差框，如图 10-36 所示。

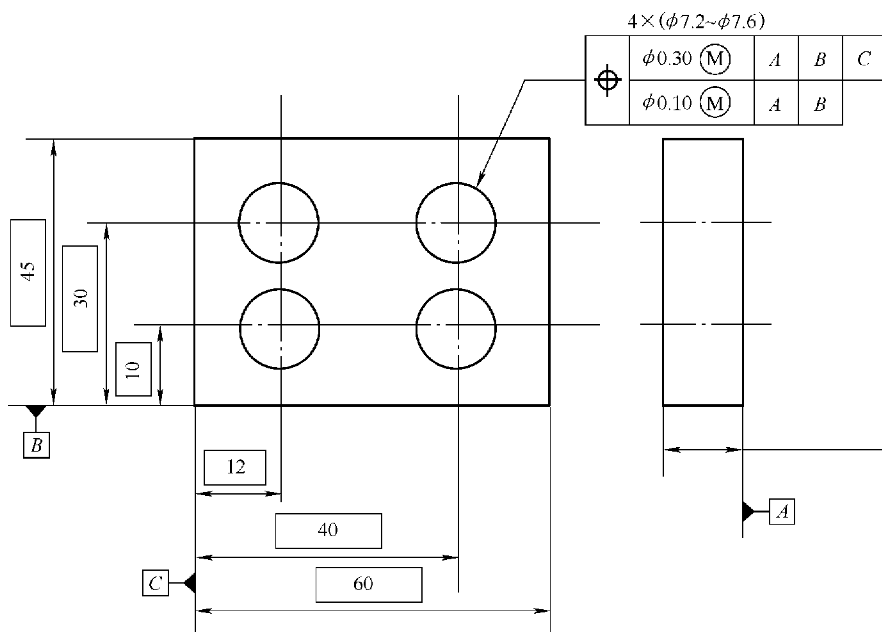


图 10-36　销钉板的公差定义（二）

图 10-36 中的组合公差控制框定义了两个装配边界，公差框上部的孔阵的位置度装配边界为 ϕ6. 9mm。这个边界的功能是同时满足销孔的装配，和两个零件的边沿平齐。但是如果需要更小的销和孔之间的装配间隙，需要研究公差框的下部装配边界定义。下面是几组例子。

如图 10-37 所示，使用公差框上部定义的装配边界，这个销钉板的位置度定义能够满足销的装配，并能保证两个零件的边沿平齐。

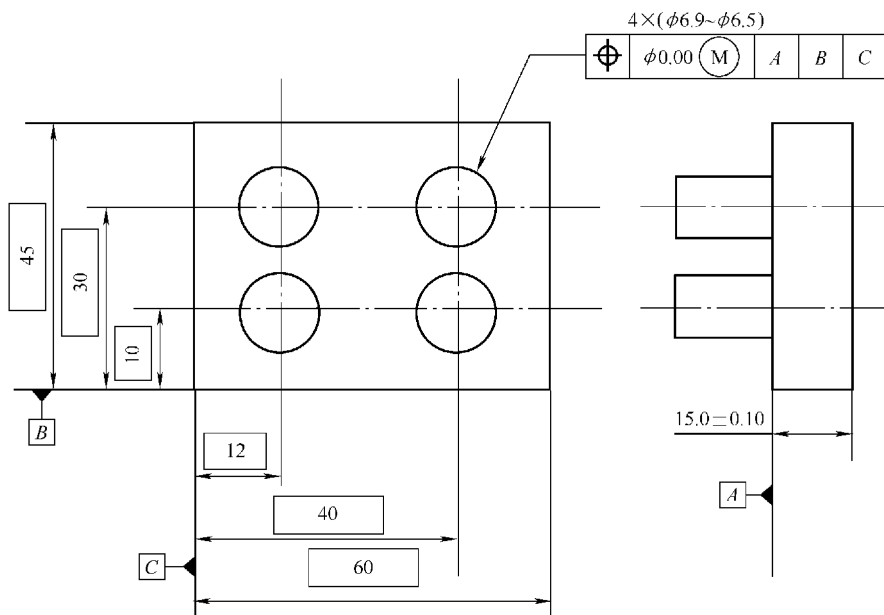


图 10-37　销钉板的公差定义（三）

如图 10-38 所示，使用公差框上部定义的装配边界，为 ϕ6. 9mm（ = ϕ6. 7mm + ϕ0. 2mm）。这个装配边界能够保证配合销钉板和孔板之间的装配，并能保证装配的边沿平齐。

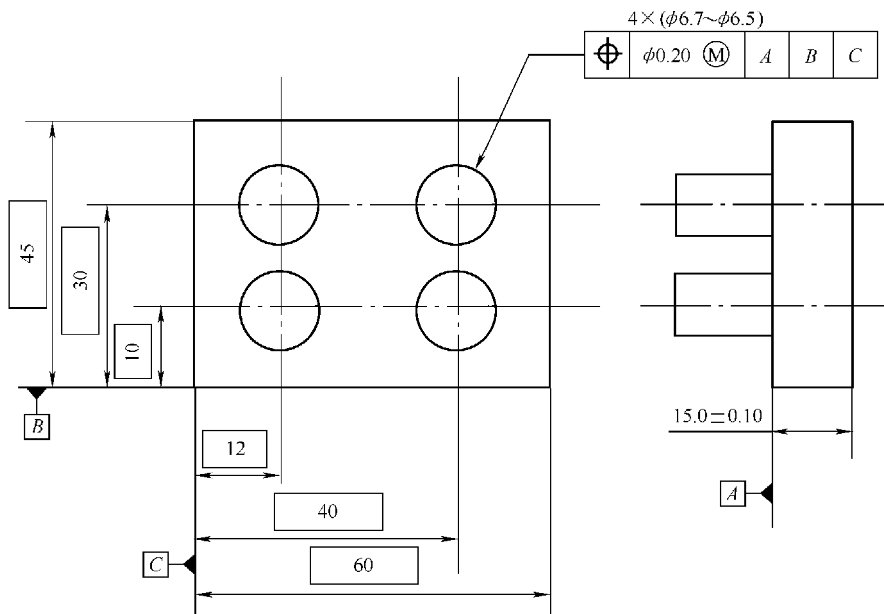


图 10-38　销钉板的公差定义（四）



如图 10-39 所示，使用孔公差框下部定义的装配边界，为 $\phi7.1\text{mm}$（$=\phi7.2\text{mm}-\phi0.10\text{mm}$）。这个设计能满足装配，但装配的边沿不能保证平齐。垂直度不能约束销的位置，只能决定销的垂直方向的误差（实际设计中可能是为了控制装配间隙的目的），所以垂直度在这里不作为装配边界设计的计算考虑。

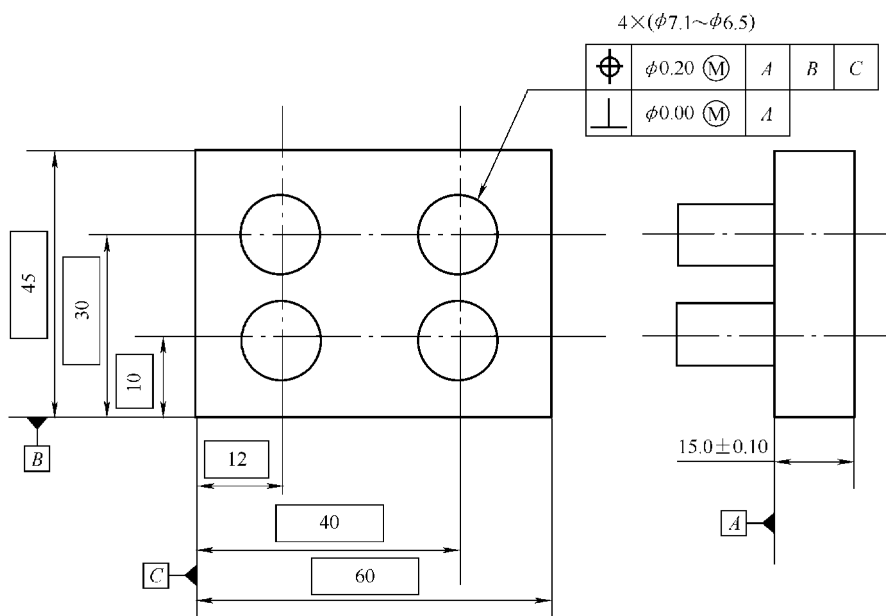


图 10-39　销钉板的公差定义（五）

如图 10-40 所示，使用孔公差框下部定义的装配边界，为 $\phi7.1\text{mm}$（$=\phi7.2\text{mm}-\phi0.10\text{mm}$）。这个设计能满足装配，因为该公差控制框决定了销和销之间的位置，但是与孔板的装配边沿可能不平齐。

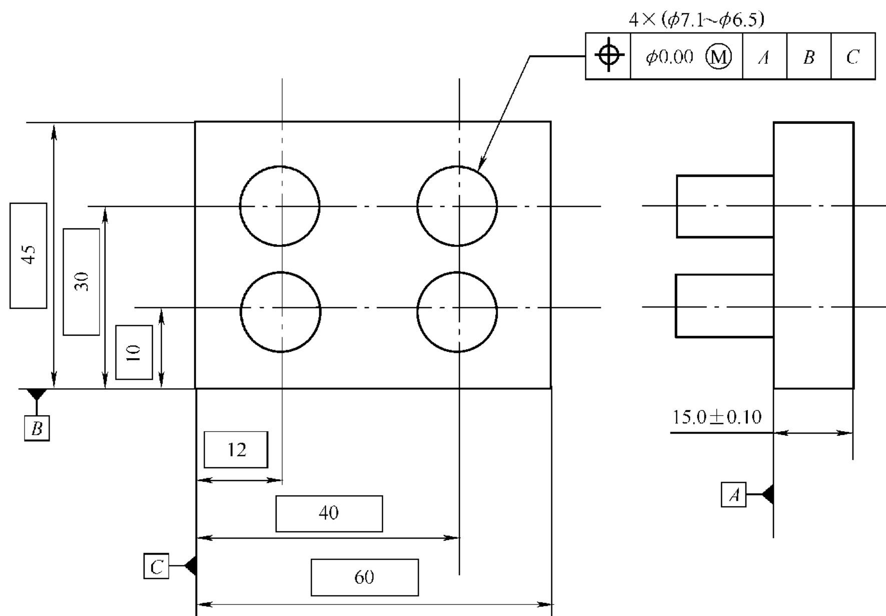


图 10-40　销钉板的公差定义（六）

十六、匹配公差设计实例一

图 10-41 所示是套筒与轴的配合设计，计算与这个套筒匹配的轴的尺寸及公差。要求：①与孔可以配合；②最低成本的公差方式。

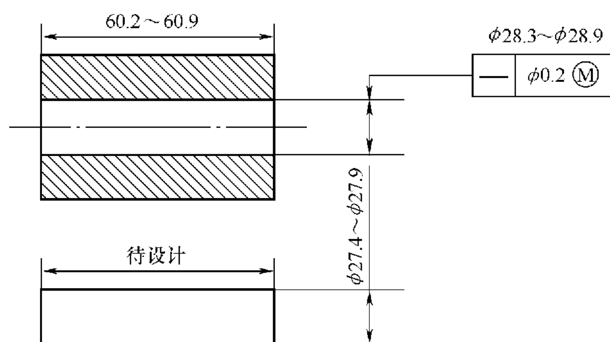


图 10-41　套筒与轴的配合设计

（1）计算长度　取套筒的最小实体长度和加工公差，得到轴的长度，如图 10-42 所示。

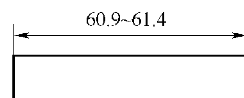


图 10-42　轴的长度定义

（2）选取几何公差的控制　综合考虑，采取和套筒同样的几何公差控制方式——直线度；因为要求最低成本，所以应用 MMC 条件，得到轴的几何公差，如图 10-43 所示。

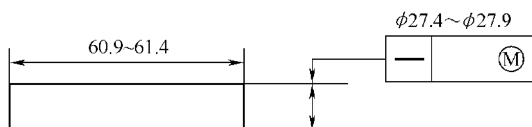


图 10-43　轴的几何公差定义（直线度）

（3）公差设定计算　由孔的给定公差可以计算出套筒的配合尺寸为 ϕ28.1mm，这也是计算匹配轴的最大实体尺寸，实际给出的轴尺寸为 ϕ27.4 ~ ϕ27.9mm，所以与套筒之间有 0.2mm 的间隙余量，填入公差框，完成计算，得到轴的完整定义，如图 10-44 所示。

	28.3	MMC
−	0.2	公差（在 MMC 时）
	28.1	孔的实效边界
−	27.9	轴的 MMC
	ϕ0.2	轴的直线度公差

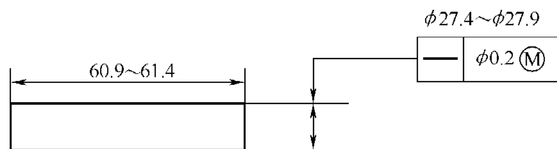


图 10-44　轴的完整定义

这个例子很简单，目的是让大家熟悉公差计算的流程，实际的操作中要收集设备的加工能力、零件的功能、检测的设备及流程，然后完成公差的设定。对于复杂检具的设计，其实也是这个流程。



十七、匹配公差设计实例二

根据图 10-45b 所示阶梯轴的几何公差，计算匹配套筒（图 10-45a）的孔的几何公差控制框中的公差值。

要求：①与阶梯轴可以配合；②最低成本的公差方式。

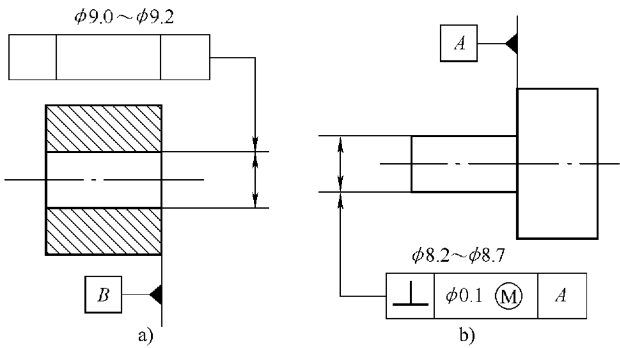


图 10-45　台阶轴与套筒的匹配设计

计算过程如下：

1）套筒的长度取阶梯轴左端的最大长度，这里不再做介绍。

2）因为阶梯轴使用垂直度控制，所以配合件也最好使用垂直度控制。在套筒的配合面上建立参考基准，定义这个装配面为基准面 *B*。因为要求最低成本，所以使用 MMC 条件修正，得到套筒的几何公差控制，如图 10-46 所示。

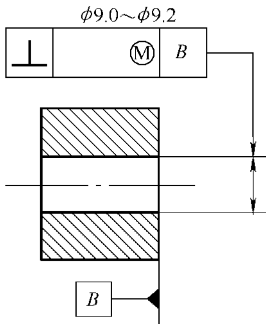


图 10-46　套筒的几何公差控制

3）公差设定。按照相关公式计算，得到套筒的孔的垂直度公差为 ϕ0. 2mm，得到套筒的完整定义，如图 10-47 所示。

	8. 7	轴的 MMC
+	0. 1	轴的垂直度公差（轴在 MMC 时）
	8. 8	轴的实效边界

	9. 0	孔的 MMC
−	8. 8	轴的实效边界
	0. 2	套筒的垂直度公差

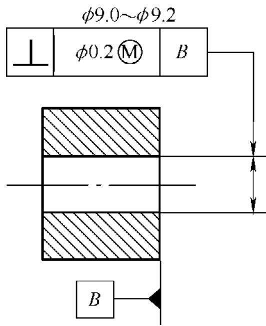


图 10-47　套筒的完整定义

十八、检具设计实例

请设计图 10-48 所示台阶轴零件的检具。

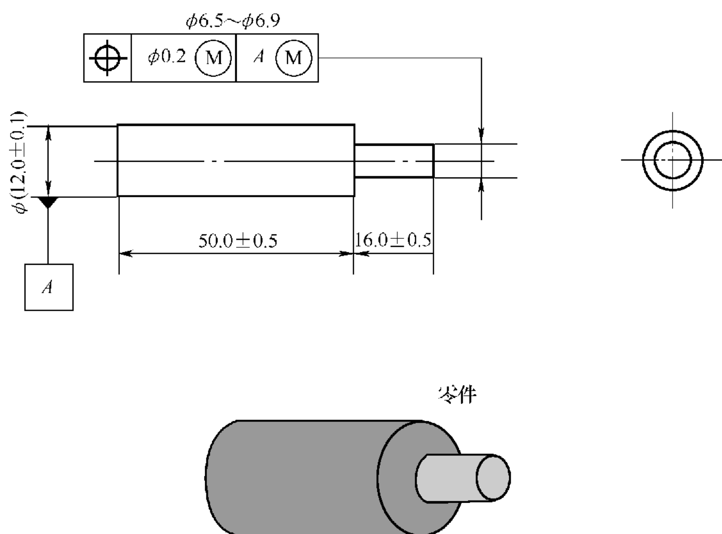


图 10-48　台阶轴零件的定义

（1）设定检具的检测方案　这是一个典型的通止规检具设计，方案是采用一个阶梯套筒，如图 10-49 所示。使用基准轴 *A*，提取 ϕ(12.0 ± 0.1)mm 特征圆柱面；再检验 ϕ6.5 ~ 6.9mm 的轴端，检测内容包括长度、位置度和直径。

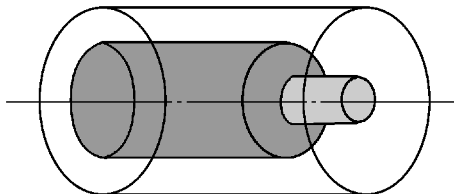


图 10-49　检具的轮廓

（2）确定检具的尺寸（图 10-50）

1）因为主基准在公差控制框中参考为 MMC，即匹配件状态或检具尺寸为其最大实体条件。所以基准段的尺寸设定为 ϕ12.1mm（实际制作中还要考虑加工公差和磨损，一般各为 5%，所以一部分合格的零件被检测为不合格）。

2）检具基准面的最小长度为零件基准特征的最大长度（为了保证基准的模拟精度），即 50.5mm（最小）。

3）受控特征（轴）的实效尺寸（匹配边界）是检具孔尺寸，即 ϕ6.9mm + ϕ0.2mm = ϕ7.1mm。实际制作中还要考虑加工公差和磨损，一般各为 5%。

4）因为传递给检具的检测直径为被检测轴的实效边界，如果检具孔应用 MMC 条件，其位置度公差必须是 ϕ0.0mm（实际上无法加工到这个精度，所以由 10% 的余量来补偿，这里的位置度为 ϕ0.02mm，如果应用几何公差标注这个检具，只能应用 CMM 或其他现有测量设备检测了，所以对于检具，有专家坚持使用尺寸公差标注，以避免“鸡生蛋和蛋生鸡”的问题）。

请大家继续思考，如果按图 10-51 所示标注应如何设置检具，这里基准 *A* 不应用 MMC 修正。

因为是 RFS 条件，所以以基准面 *A* 上的高点模拟基准轴线 *A*。基准 *A* 特征面的实际尺寸为检具尺寸，一般通过自定心卡盘模拟。

图 10-52 所示为基准 *A* 无修正的检测设置。



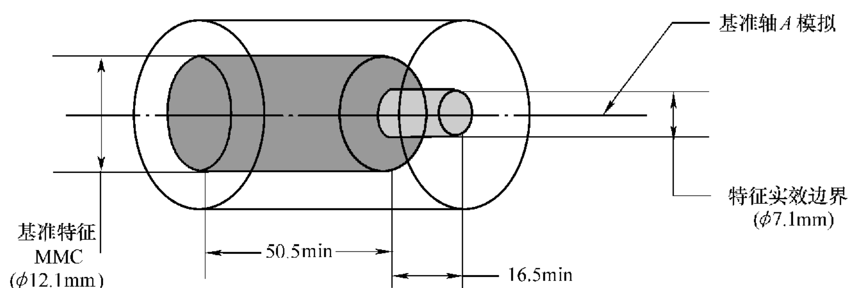


图 10-50　检具需要确定的尺寸

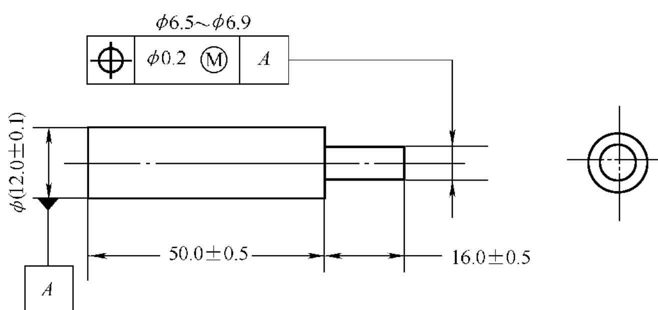


图 10-51　基准 A 无 MMC 修正的情况

十九、工艺基准的设置及检测方案设置

图 10-53 所示是一个实际的管形零件图的标注，由图样分析可知，除了缺少长度信息，如果是以成形管型材加工，几何公差的标注可以满足生产和检测。检测设置如图 10-54 所示。因为两个面是 RFS 的约束关系，所以必须采用数值型检具测量。

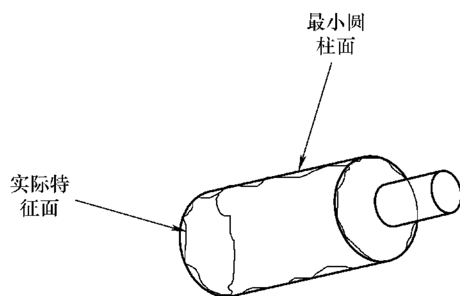


图 10-52　基准 A 无修正的检测设置

两个 V 形架模拟基准轴线 A，高度尺上的千分表同端面做全接触扫描测量，第一点设置归零，如果指针的跳动量在 0.3mm 之内，则零件合格。任何一点超出 0.3mm，意味着垂直度超出规定范围，判定为不合格。

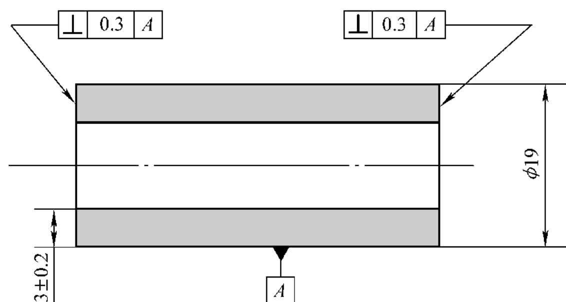


图 10-53　管形零件图

但该零件测量方式的可重复性不佳，因为这个零件的轴线是由圆柱面上的四条与 V 形架的接触线模拟出来的，在下次的测量中，这条轴线 A 会因为模拟的轴线的变化而变化，导致

测量的结果产生差异，使可重复性变差。而且对于数值型测量，无法实现100%的检查。

分析这个零件的设置方式，有可能是由圆棒料或管材加工成的，ϕ19mm是棒料的外径，默认使用标题框中的公差或标准棒料的外径公差（无需加工）。实际的加工重点应该是两个端面和孔。对于这两个端面，有平齐要求（垂直度为0.3mm）。根据使用目的和加工工艺，其设计可以进行优化，以便取得更可靠的设计，并达到降低成本的目的。

如果这个零件是由棒料加工成的，那么图10-53所示的尺寸标注就不再合适了，需要做出转化。首先需要明确这个零件的加工工艺，对于棒料的加工，工艺可以简化，如图10-55所示。

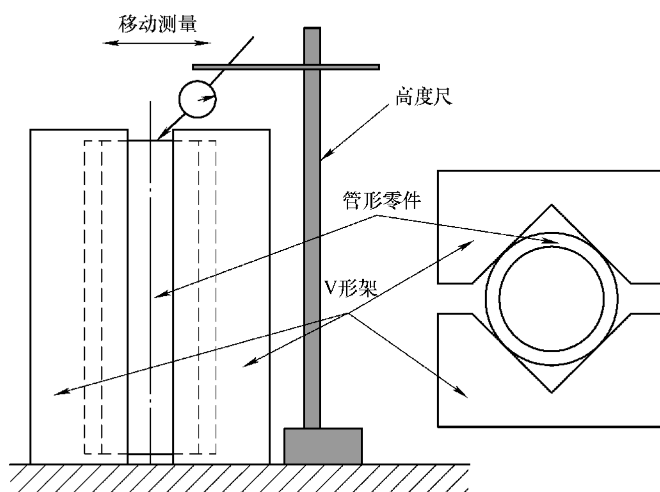


图10-54　检测设置

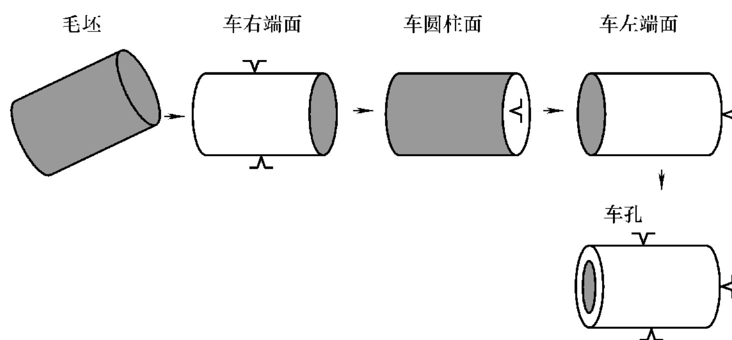


图10-55　简化后的棒料加工工艺

第一道工序是使用毛坯面粗定位车主定位面，即右端面。使用临时基准面，即棒料的毛坯圆柱面作为基准。

第二道工序是使用加工的右端面作为基准，加工圆柱面（假设为$\phi19\pm0.2$mm）。

第三道工序是使用右端面作为基准，加工左端面。

第四道工序是使用右端面和圆柱面作为基准，加工孔。

根据加工工艺，其零件图的完整标注如图10-56所示。

图 10-56 中的右端面为主基准 A，为加工的第一道工序，这个零件的其他基准以及特征都相对于这个主基准 A 建立。按照图 10-56 中的要求，这个主基准面 A 与圆柱面的垂直度是 ϕ0.3mm，考虑经济性，没有特殊的要求，所以使用 MMC 条件，其实效边界尺寸为 ϕ19.5mm。按照 ASME Y14.5 的第一原则，遵循最大实体尺寸为理想尺寸原则，要求每个圆柱面截面尺寸不小于 ϕ18.8mm（止规），整个圆柱面尺寸包容在 ϕ19.2mm 之内（通规）。在测量时，如果使用止通规，还需要考虑止通规设计尺寸的 10% 的磨损和制造误差。垂直度检验可以使用实效边界尺寸为 ϕ19.5mm 的套筒（以 A 为基准）检测。孔的尺寸是由原图壁厚尺寸（3 ± 0.2）mm 转换过来的。考虑孔的对中性和装配要求，最适合使用位置度控制。由壁厚和圆柱面尺寸可以计算待加工孔的 MMC 和 LMC，考虑经济性和固定的孔的实效尺寸 ϕ12.4mm，位置度公差使用 MMC 修正，位置度在 MMC 时公差为零，当孔的尺寸从 MMC 变化到 LMC 时，可以获得相应的补偿公差。

图 10-56　优化后的零件图

图 10-56 所示的标注方式保证了检测和加工工艺的基准统一，不会产生生产部门检测合格（或供应商供货出厂合格），但是质量部门出厂检验不合格（或客户验收不合格）的分歧，以减少不必要的浪费。

图 10-57 所示是这个零件的通规设计，用来检验圆柱面的尺寸。如果零件能够通过通规，那么零件 100% 合格。若不能通过，表明圆柱面尺寸超出 MMC，为不合格。但是考虑通规 10% 的磨损和制造误差，一部分合格的处于边界尺寸的零件会被当作不合格零件检出。通规的边缘应尽量保持尖锐，以防止倒角产生的导向作用破坏通规，或产生错误的检测结果。

图 10-57　通规设计

图 10-58 所示为左端面平行度的测量，以基准 A 为参考，如果千分表示值在 0.3mm 之内，则零件合格；若超出 0.3mm，表明零件不合格。

图 10-59 所示是位置度和垂直度检验的功能检具。若零件可以放入套筒，表明垂直度和位置度都能够满足要求，检出的零件 100% 合格。如果零件不能放入套筒，考虑检具有 10% 的磨损和制造误差，则大部分被检测出的零件不合格，有一小部分处于边界尺寸的零件合格。

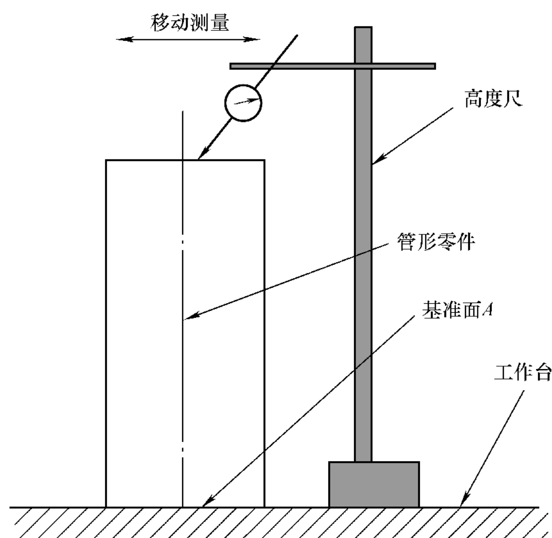


图 10-58　左端面平行度的测量

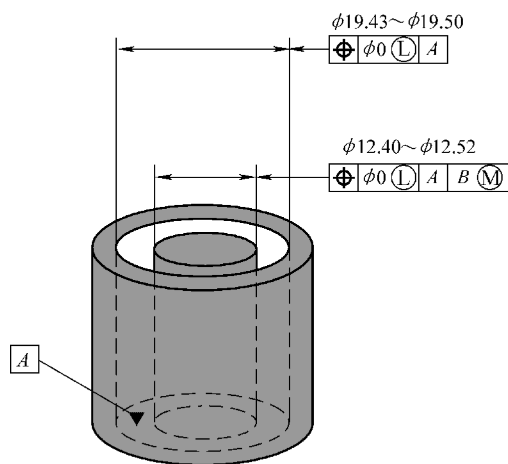


图 10-59　孔和圆柱面垂直度的功能检具

二十、公差分析

如 10-60 所示，零件的边 *A* 到孔 *B* 下边缘的距离大小是常常遇到的问题。边 *A* 和孔 *B* 处于同一个基准框架。边 *A* 是一个等边的面轮廓度控制，单边公差为 0.15mm，孔 *B* 在最大实体尺寸 ϕ9.3mm 时，位置度公差为 ϕ0.4mm 的圆柱面，因为是用 MMC 条件修正公差带，根据补偿原理，可以求得孔在最小实体尺寸 ϕ9.6mm 时的位置度公差是 ϕ0.7mm 的圆柱面公差带。当孔处于最大实体尺寸时，位于位置度公差带 ϕ0.7mm 的最低点是代表边 *A* 和孔 *B* 下边缘的距离为要求的最大距离，即

$$[75+0.3/2+9.6/2+(0.4+0.3)/2]\text{mm}=80.3\text{mm}$$

边 *A* 到孔 *B* 下边缘的最小距离为

$$(75-0.3/2+9.3/2-0.4/2)\text{mm}=79.3\text{mm}$$

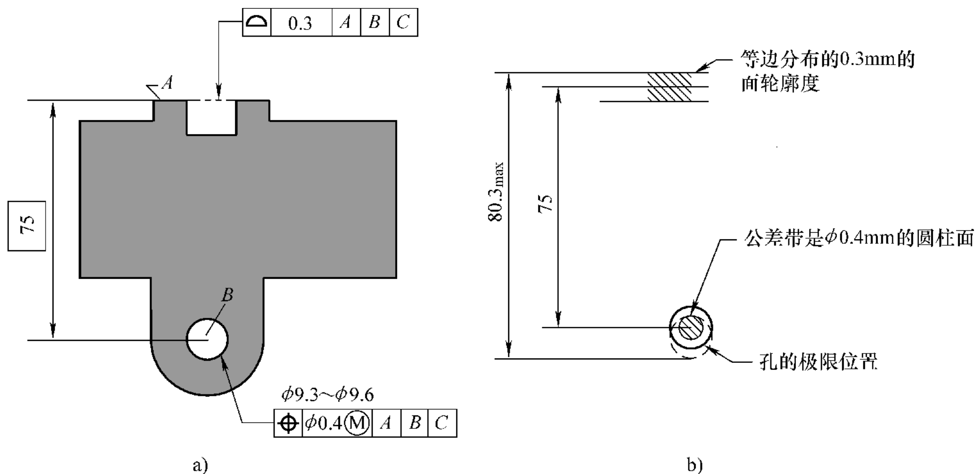


图 10-60　边到孔的下边缘的距离

a）零件图　b）公差带示意图



实际加工的零件，当边 A 到孔 B 下边缘的距离在 79.3 ~ 80.3mm 之间都是合格的。

如图 10-61 所示，零件的边 A 和孔 B 不再处于同一个基准框架，其中孔 B 是建立在边 A，即基准 A 之上的，所以 A 的面轮廓度不再考虑在这个尺寸链上的累积误差，那么，边 A 到孔 B 下边缘的最大距离为

$$[75 + 9.6/2 + (0.4 + 0.3)/2]\text{mm} = 80.15\text{mm}$$

边 A 到孔 B 下边缘的最小距离为

$$(75 + 9.3/2 - 0.4/2)\text{mm} = 79.45\text{mm}$$

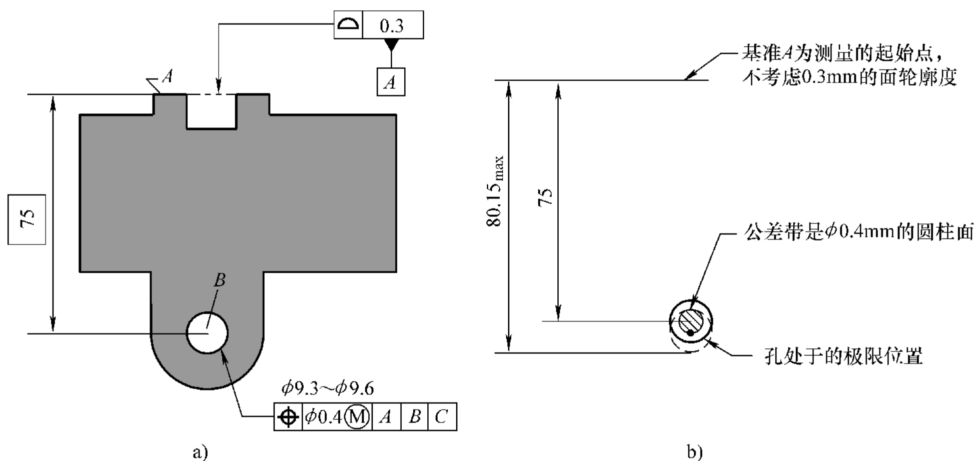


图 10-61　边到孔的下边缘距离计算

a）零件图　b）公差带示意图

通过以上的两个例子可以看到，如果改变基准的设置，可以减少公差累积效应。

一个适当标注几何公差的图应该能够解读出设计者设定的检测和工艺信息。例如，D 形孔的标注。图 10-62 所示的标注不是一个适当的标注方法，D 形孔的直边是无法定位的，对于尺寸 18 ±0.2，这个标注中无法得出直边的位置信息，所以这个 D 形孔的功能检测销是无法设置的。因此，图 10-62 所示的尺寸定义只有检测信息，没有设计信息。

一个适当的标注方法应如图 10-63 所示，使用公称尺寸和轮廓度的方法定义直边。这样

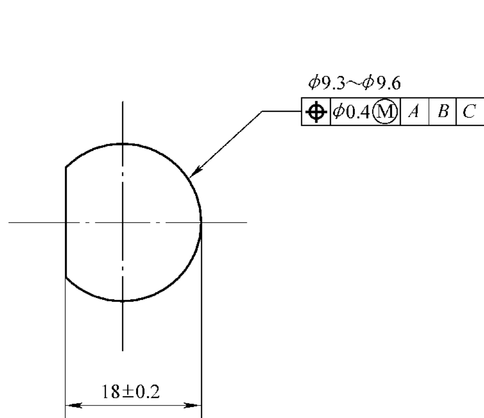


图 10-62　D 形孔的标注

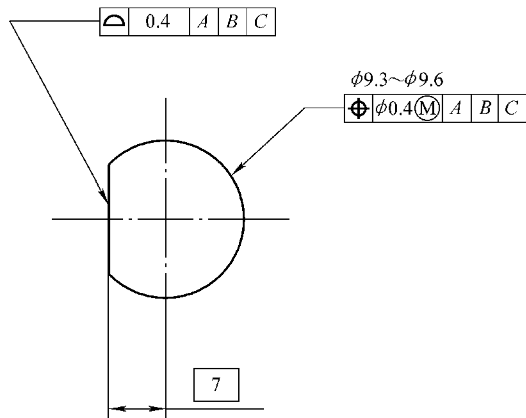


图 10-63　D 形孔的优化标注

制作D形孔的直边就有了明确的位置定义，无论这个D形孔是冲压的还是利用CNC制作出来的，都有明确的位置定义。这个D形孔的通止规的设置如图10-64所示。本设置考虑了10%的磨损和加工误差，并按照通过的检测零件100%合格的绝对条件设置。

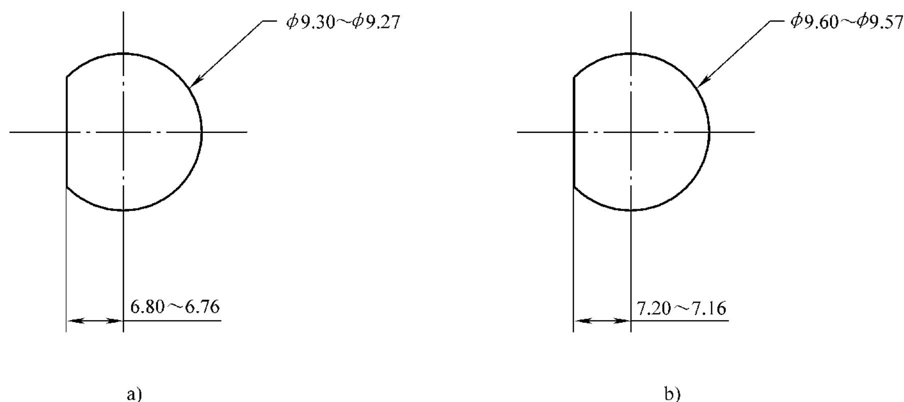


图10-64　D形孔的通止规的设置

a）D形孔的通规尺寸　b）D形孔的止规尺寸

D形孔的位置度检测销（也称为功能检测销）设置如图10-65所示。本设置考虑了10%的磨损和加工误差，并按照通过的检测零件100%合格的绝对条件设置。

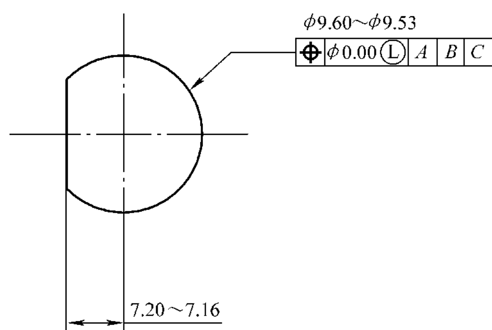


图10-65　D形孔的位置度检测销设置

二十一、环套的最小壁厚计算

图10-66所示是一个环套零件，外圆柱面为基准A，定义了环套的内表面中心线的位置（同轴）的公差带为在内孔最小实体尺寸ϕ8.5mm时，内孔的轴线位置度公差为ϕ0.2mm的圆柱面。

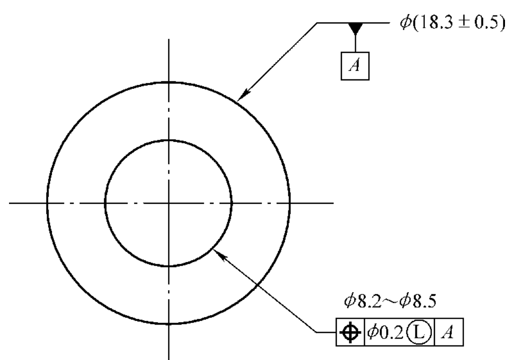


图10-66　环套零件尺寸

环套的最小厚度临界状态如图10-67所示。

所以环套的最小壁厚为

$(17.8/2-1.0/2-8.5/2-0.2/2)\text{mm}=4.5\text{mm}$

但是如果以环套内孔作为基准来计算壁厚，如图10-68所示，计算原理和图10-67所示的标注方法相同。对于内孔ϕ8.2mm，MMC为理想边界的尺寸为ϕ7.7mm。根据ASME Y14.5的第一法则，此时尺寸ϕ(8.2±0.5)mm的最大实体尺寸包容面为ϕ7.7mm，而且这个孔的每一个截面的相对点的尺寸（直径方向）不能大于ϕ8.7mm。可以看出，当孔处于LMC时，可以弯曲或倾斜，导致环套壁厚缩减。

所以以环套内孔为基准的最小壁厚（图10-69）为



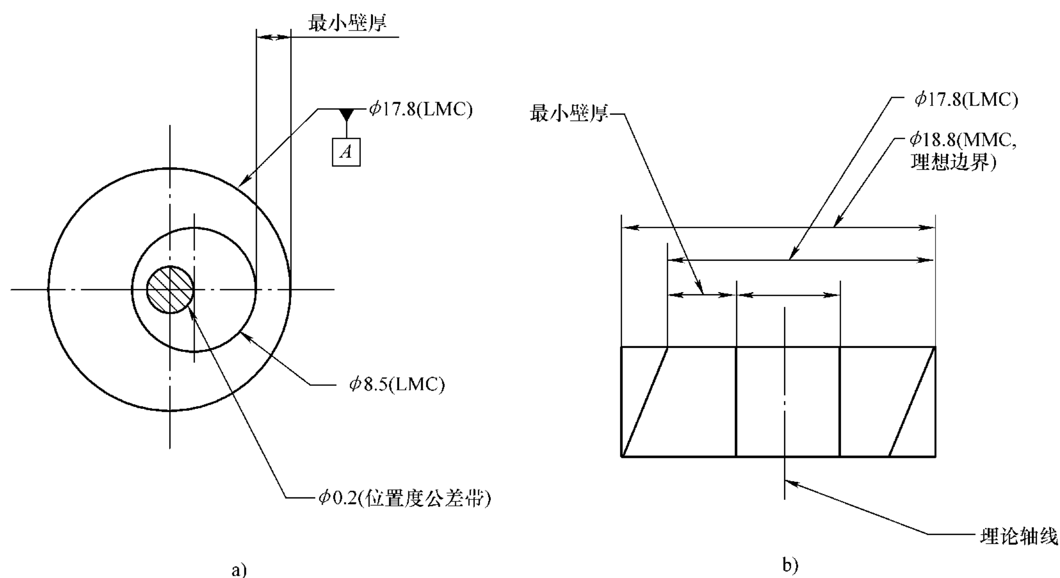


图 10-67　环套的最小厚度临界状态

a）考虑位置偏差的影响　b）考虑形状偏差的影响

$$(18.2/2-0.2/2-8.7/2-1.0/2)\,\mathrm{mm}=4.15\,\mathrm{mm}$$

其中，这个等式中的 1.0/2 来自于形状误差，所以最小厚度是 4.15mm。

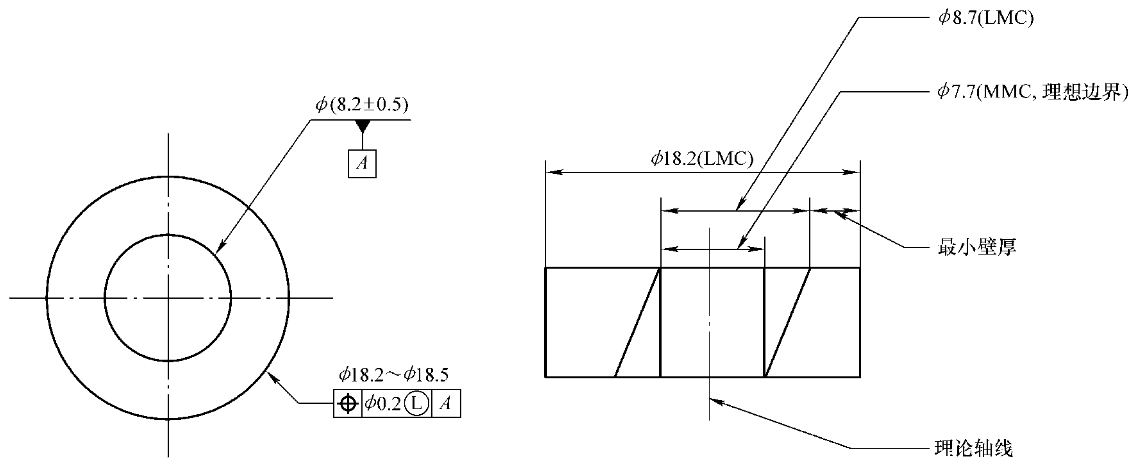


图 10-68　以环套内孔作为基准

图 10-69　以环套内孔作为基准的最小壁厚示意图

术 语 解 释

公差，Tolerance——一个特定尺寸的最大允许变差，是上极限尺寸和下极限尺寸的差。

几何公差，Geometric Tolerance——控制尺寸、形状、轮廓、方向、位置和跳动公差的统称。

特征，Feature——代表一个零件数模或图样上的特定部位，如面、销和槽。

轴线特征，Feature Axis——无方向参考的特征的实际匹配包容界面的轴线。

中心面特征，Center Plane of Feature——无方向参考的特征实际匹配包容界面的中心平面。

最大实体材料条件 MMC，Maximum Material Condition——在尺寸范围内，包含最多材料状态的特征的尺寸，比如最大的轴直径和最小的孔直径。

最小实体材料条件 LMC，Least Material Condition——在尺寸范围内，包含最少材料状态的特征的尺寸，比如最大的孔直径或最小的轴直径。

尺寸不相关原则 RFS，Regardless of Feature Size——几何公差在尺寸公差变化时固定不变的应用原则。

最大实体材料边界 MMB，Maximum Material Boundary——修正基准特征，表示基准特征的尺寸公差范围内，在材料外部的极限尺寸。

最小实体材料边界 LMB，Maximum Material Boundary——修正基准特征，表示基准特征的尺寸公差范围内，在材料内部的极限尺寸。

基准特征修正符号 RMB，Regardless of Material Boundary——以特征的极限边界包容界面（从 RMB 变化到 LMB 与基准特征接触时的尺寸界面）作为基准模拟的尺寸。

实效边界 VC，Virtual Condition ——由 MMC 和 LMC 同几何公差形成的一个常量边界。

尺寸特征 FOS，Feature of Size——分规则尺寸特征（Regular Feature of Size）和非规则尺寸特征（Irregular Feature of Size）。规则尺寸特征是由尺寸公差定义的特征，为规则的圆柱面、球面、圆环和平行特征。非规则尺寸特征又包含由球面、圆柱面或平行平面组合而成的尺寸特征，以及由非球面、圆柱面或平行平面组合而成的尺寸特征。

公称尺寸，Basic Dimension ——也称为理论正确尺寸，定义了公差带理论的位置或特征的理论尺寸。图样或数模上标注在矩形框中。

参考尺寸，Reference Dimension——通常不规定公差的尺寸，只用来作为信息参考使用，不检测。

延伸公差带，Project Tolerance Zone——同位置度公差配合使用，定义了在配合面之上的一段特定高度（匹配零件的装配厚度）上的公差带，目的是防止固定配合的销钉或螺栓因为垂直度的原因导致的干涉。

包容原则，Envelope Rule——也称为几何公差第一原则，规则几何特征的形状由尺寸公差约束，规则几何特征的表面不能超出理想边界，即最大实体边界。ASME 默认包容原则，如果需要独立原则，使用符号①修正，如图 1-10 所示。

独立原则，Independency Rule——特征的最大实体尺寸不是理想包容面，没有公差补偿，不对特征的形状定义。其符号和标注形式如图 1-10 所示。

特征控制框，Feature of Frame——特征的几何公差控制符号，包含控制符号、公差值框和基准框架三部分。

基准框架 DRF，Datum of Reference Frame——建立了 *X*、*Y* 和 *Z* 三个坐标平面，并在空间上约束了零件的 6 个自由度的坐标平面设置，最小建立条件是 3 –2 –1 原则。

自由状态 Free State——零件的不受力状态。

统计公差符号 ST，Statistical Tolerance Symbol——用于表明统计公差，一般应用在关键尺寸上，表示尺寸需要进行跟踪控制。

汽车先进技术论坛丛书

- 中国汽车节能思考
- 概念汽车开发
- 汽车平顺性与悬架系统设计
- 车辆工程仿真与分析——基于MATLAB的实现
- 车辆悬架弹性力学解析计算理论
- 车辆稳定控制技术
- 车辆结构有限元分析
- 汽车及其驱动系统虚拟产品开发
- ADVISOR 2002 电动汽车仿真与再开发应用
- 汽车NVH综合技术
- GD&T基础及应用

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号


扫一扫，更多汽车技术图书任你选！

ISBN 978-7-111-54292-6
策划编辑◎孙鹏
QQ:495025020
e-mail: spxingyang@126.com

ISBN 978-7-111-54292-6


定价：69.90元